



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut
Maaehituse ja veemajanduse õppetool

Ott Karu

**KIILUKUJULISE RISTLÕIKEGA PUITLAMELLIDEST
SILLATEKI MUDELITE KÄITUMISE UURIMINE
PALJU-TSÜKLILISEL KOORMAMISEL**

INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF BRIDGE DECK
MODELS MADE OF WEDGE-SHAPED CROSS-SECTION
TIMBER LAMELLAE UNDER MULTI-CYCLE LOADING

Ehitusinseneriõppe magistritöö
Maaehituse õppekava

Juhendajad: lektor Tõnis Teppand, *MSc*;
lektor Renno Reitsnik, *MSc*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Ott Karu		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: Kiilukujulise ristlõikega puitlamellidest sillateki mudelite käitumise uurimine palju-tsüklilisel koormamisel			
Lehekülgi: 76	Jooniseid: 34	Tabeleid: 3	Lisasid: 6
Osakond / Õppetool: Maaehituse ja veemajanduse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Tsiviilehitus (T220)			
Juhendaja(d): Tõnis Teppand, Renno Reitsnik			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2019			
<p>Eestis pole puitsildade ehitamine väga levinud, kuid puitu tuleks sillaehitusmaterjalina kaaluda heade omaduste tõttu – hea tugevus oma mahukaalu kohta ning eriti elastsus. Puit on väliskeskkonda sobiv materjal, kui seda seal õigete ehitusvõtetega kaitsta. Uurimistöö eesmärgiks oli taastada Liis Kullamaa magistritöö (2018) tugevuskatsete käigus kahjustada saanud kiilukujulistest lamellidest koosnevad katsekehad (osa eelpingestatud sillateki kaksikkõverast plaadist) ning uurida nende käitumist palju-tsüklilisel koormamisel, eeldusel, et katsekehade taastamine ei muuda oluliselt tulemusi. Katsete käigus jälgiti katsekehade jäävdeformatsioonide teket ning katsekehade koormusele vastupanuvõime vähenemist. Katsete tulemuste analüüsi järgi selgus, et katsekehade taastamine (amortiseerunud lamellide väljavahetamine) mängis olulist rolli ning seetõttu ei saadud statistilisi keskmisi tulemusi, millega võrrelda erinevate seeriade tulemusi ja eeltõuse. Autor hindas katsekehade käitumist, arvestades nende taastamist ja eelnevat koormamist ning leidis, et väikese eeltõusuga katsekehades niiskusesisalduse vähenemisel võtsid katsekehad lamellide omavahelise kinnitusviisi tõttu vastu väiksemat koormust. Autori hinnangul peaks järgmisena ehitama valmis mõõtkavale vastava suuremõõtmelise mudeli, mis annaks parema ettekujutuse, kuidas antud konstruktsioon suuremate silletega ning seejuures väiksema lamellide ristlõikega tööle hakkab.</p>			
Märksõnad: puitkonstruktsioonid, puitlamell, sillatekk, palju-tsükliline, koormamine			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master's Thesis	
F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Author: Ott Karu		Curriculum: Civil Engineering (382)	
Title: Investigation of behaviour of bridge deck models made of wedge-shaped cross-section timber lamellae under multi-cycle loading			
Pages: 76	Figures: 34	Tables: 3	Appendixes: 6
Department / Chair: Chair of Rural Building and Water Management			
Field of research and (CERC S) code: Civil Engineering (T220)			
Supervisors: Tõnis Teppand, Renno Reitsnik			
Place and date: Tartu 2019			
<p>Construction of timber bridges is not very common in Estonia, but timber should be considered as a bridge building material due to its good properties - good strength-to-weight ratio and especially elasticity. Timber is suitable material at outdoor environment if it is properly protected with the right construction techniques. The purpose of this thesis was to restore specimens made of wedge-shaped cross-section timber lamellae (part of double curved prestressed bridge deck) which were damaged during the strength tests of Liis Kullamaa (2018) master's thesis and to investigate their behaviour under multi-cycle loading, assuming that the reconstruction of specimen would not change significantly the test results. During the tests, the residual strain of the specimens and the specimens decreasing load capacity were observed. Analysis of test results showed that the reconstruction of test specimens (replacement of the damaged lamellae) played an important role and therefore no statistical average was not obtained to compare the results and pre-ascent of the different series. The author assessed the behaviour of the test specimens, taking into account their reconstruction and pre-loadings, and found that due to low moisture content the test specimens with small pre-ascent had smaller load capacity because of the lamellae fixation method. According to the author, a large-scale model should be built next to see how the design will work with larger spans and with a smaller cross-section of lamellae.</p>			
Keywords: timber structures, timber lamellae, bridge deck, multi-cyclic, loading			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. KIRJANDUSE ANALÜÜS	9
1.1. Puit ehitusmaterjalina	9
1.1.1. Okaspuidu struktuur.....	10
1.1.2. Puidu füüsilised omadused	11
1.1.3. Puidu mehaanilised omadused	13
1.2. Puitsillad.....	16
1.2.1. Puit sillamaterjalina läbi aegade.....	16
1.2.2. Puitsildade konstruktiivsed tüübid.....	20
1.2.3. Puitsildade ajalugu Eestis.....	23
1.2.4. Pingelamellplaadist sillatekkide ajalugu.....	25
1.2.5. Pingelamellplaadist sillateki konstruktsioon.....	25
1.2.6. Pingelamellplaadist sillatekiga kaasnevad probleemid.....	28
1.2.7. Kaarekujuga pingelamellplaadist sillad	30
2. MATERJAL JA METOODIKA	31
2.1. Valim ja katsekehad.....	31
2.2. Materjal ja töötlus.....	32
2.2.1. Materjal ja visuaalne sorteerimine.....	32
2.2.2. Lamellide töötlus	33
2.3. Kruvikava.....	37
2.4. Katsekehade kokkupanek.....	38
2.5. L. Kullamaa magistritöö katsekehade taastamine	39
2.5.1. Katsekehade lahti võtmine	39
2.5.2. Katsekehade kokkupanek.....	43
2.6. Katsemetoodikad	44
2.6.1. L. Kullamaa katsemetoodika.....	44
2.6.2. L. Kullamaa katsetulemuste kokkuvõte.....	46
2.6.3. Autori katsemetoodika	46
3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	51
3.1. Katsete tulemused.....	51
3.2. Analüüs	54
3.3. Arutelu	61
KOKKUVÕTE	65

KASUTATUD KIRJANDUS	67
LISAD	70
Lisa 1. Seeria 01 katsekehade ja katsete andmed	71
Lisa 2. Seeria 02 katsekehade ja katsete andmed	72
Lisa 3. Seeria 03 katsekehade ja katsete andmed	73
Lisa 4. Seeria 04 katsekehade ja katsete andmed	74
Lisa 5. Seeria 05 katsekehade ja katsete andmed	75
Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	76

SISSEJUHATUS

Puit on maailmas üks vanemaid ehitusmaterjale. Puidul on hea tugevus oma mahukaalu kohta, ta on elastne ning väga hästi töödeldav materjal. Vaatamata mõningatele puudustele nagu näiteks niiskusest tulenevad mahumuutused ning vastuvõtlikkus seenkahjustustele on puit tänu oma muudele headele omadustele ka tänapäeval ehituses laialdaselt kasutatav nii konstruktsiooni- kui ka viimistlusmaterjalina. Lisaks sellele on puit raudbetooni ja terasega võrreldes ka odavam ning looduslik materjal.

Tänapäeva ühiskonnas on oluline keskkonnasäästlikkus. Puit on taastuv loodusvara, kuniks ei raiuta metsa rohkem, kui see uueneda jõuab. Eesti pindalast üle poole on kaetud metsamaaga. Kuigi Eesti puitmaterjalide toodang on suur (valdavalt ekspordiks), siis Eestis kasutatakse tähtsamate konstruktsioonide puhul ikkagi pigem terast või raudbetooni. Muidugi tasub siin välja tuua, et tänu liimpuidu võidukäigule on puidu kasutamine konstruktsioonides viimastel kümnenditel oluliselt tõusnud.

Kuigi Põhjamaades kasutatakse puitu sageli ka sillaehitusmaterjalina maantee-sildade puhul, siis Eestis see nii ei ole. Siiski on Eestis hakatud puidust sildu ehitama järjest rohkem, kuid enamasti on need jalakäijate sillad. Maanteeameti andmetel (2016) on seisuga 01.01.2016 Eesti riigiteedel 994 silda. Antud arvestuses on sees sillad, viaduktid ning rajatised, millest 846 on sillad, 147 viaduktid ning 1 tunnel. Enamik sildadest on lühikesed sillad, mis jäävad pikkuselt vahemikku 3...25 m ning protsentuaalselt on neid 70,7%. Peamise ehitusmaterjali järgi jagunevad sillad betoon-, metall-, kivi- ning puitsildadeks. Enamik riigiteede sildadest, 79,1% on ehitatud betoonist, metallist sildu on 18,3%, müüritisest 1,8% ning puidust vaid 0,8%. Umbes pooled riigiteedel olevad sillad jäävad ehitamise aja järgi vahemikku 1950-1980. (Maanteeamet 2019)

Eestis puuduvad oskused ehitada kestvaid puitsildu ning inimestel pole ka eriti usku puitu kui kestvasse sillaehitusmaterjali. Ebausku võimendab Vaida silla varing. Põhjusteks olid lihtsalt valed ehitusvõtted ning puudulikud juhendmaterjalid, mitte vale ehitusmaterjali valik.

Lisaks on Eestis puitsildade vastu umbusalduse tekkimisel mänginud rolli peale teist maailmasõda maanteedele kiiruga mittekvaliteetselt ehitatud puitsillad. Seejärel viidi 1960. aastatel ellu Eesti NSV-s “Puitsildade likvideerimise programm”, mille käigus puitsildade arv oluliselt vähenes. (Just, A. jt 2015: 5)

Käesolev uurimus on seotud puidust pingelamellplaadist sillatekkide edasiarendusega. Autorile teadaolevalt ei ole Eestis pingelamellplaadist sillatekke ehitatud. Kuigi antud meetod sillatekkide ehitamisel on kogunud maailmas populaarsust, seda eriti Põhjamaades, siis kaasnevad sellega kahjuks ka probleemid. Pingelamellplaadist sillatekkide puhul on probleemiks eelpinge vähenemine ning sellega seonduvalt vajub sillatekk nõgusaks. Nõgusaks vajunud sillatekkidele jäävad seisma sademed, mis võivad mittekvaliteetse hüdroisolatsiooni korral tõsta konstruktsiooni niiskusesisaldust, mis puidu puhul viib omakorda selle pehastumiseni. Eelpinge vähenemise peamiseks põhjusteks on niiskusesisalduse muutusest tulenevad mahumuutused ning puidus tekkiv roome. Kui niiskusesisaldus väheneb, tekivad puidus mahukahaned, väheneb varrastega tekitatud eelpinge ning kaob lamellide vaheline hõõrdejõud. Sama kehtib ka puidu roome puhul, kui sillateki plaadi lamellide vahele tekivad väsimusest tingitud vahed.

Antud uurimus on seotud Liis Kullamaa (edaspidi Kullamaa) 2018. aastal kaitsnud magistritööga “Läbipainete ja jäävdeformatsioonide uurimine tsüklilisel koormamisel kiilukujulise ristlõikega puitlamellidest sillateki mudelitel”. Käesoleva töö autor oli diplomipraktika käigus abiks Kullamaa magistritöö katsekehade ehitamisel ning katsete läbiviimisel. Kullamaa poolt konstrueeriti puitlamellidest koosnevad erineva eeltõusuga katsekehad. Eeltõus saavutati tänu kiilukujulistele lamellidele, mille ristlõige on ottest laiem kui keskelt. Sellise konstruktsioonitüübiga tahetakse lahendada pingelamellplaatidest sillatekkide eelnevalt välja toodud probleeme sillatekkide eeltõusu andmise näol. Kuna konstruktsioon kinnitatakse kõigist neljast nurgast X- ja Y-telje suunas kinniste liigendtugedega, siis tänu eeltõusule ning kiilukujulistele lamellidele surutakse need koormuse rakendamisel omavahel kokku. Kui niiskusesisaldusest tingituna tekivad lamellides mahumuutused, siis konstruktsiooni eeltõus suureneb või väheneb, kuid tänu kiilsilluse efektile ei vaju sillatekk nõgusaks. Oluline on välja tuua, et käesoleva uurimuse katsekehad ei ole mõõtkavalt vähendatud sillateki mudelid, vaid n-ö väljalõigatud osa suuremast sillatekist. Materjalide ristlõiked ning mudelite suurus on Kullamaa poolt valitud vastavalt saadaolevatele vahenditele ning materjali töötlemise võimalustele.

Käesoleva uurimistöö esimene eesmärk oli Kullamaa katsete käigus toimunud katsekehade tehnilise seisukorra hindamine ning nende taastamine amortiseerunud lamellide väljavahetamisega uute vastu. Seejärel oli eesmärgiks viia katsekehadega läbi palju-tsüklilisi koormamisi, analüüsida seejuures jäävdeformatsioone, koormusele vastupanuvõime vähenemist ning nende sõltuvust erinevate katseseeriade eeltõusudest. Lisaks taheti võimalusel võrrelda tulemusi Kullamaa poolt läbiviidud katsete tulemustega. Autor eeldas, et kuna Kullamaa hinnangul ei tekkinud katsekehadel suuri plastseid jäävdeformatsioone, siis osade katsekehade taastamine ei muuda seeriasiseselt oluliselt uute katsete tulemusi.

Töö esimeses peatükis kirjeldatakse puidu omadusi, mis on sillaehituse juures ning antud töö kontekstis olulised. Antakse põgus ülevaade puitsildade ajaloost valitud näidete põhjal, puitsildade konstruktiivsetest tüüpidest, puitsildade ajaloost Eestis ning pingelamellplaadist sillateki ajaloost. Lisaks sellele kirjeldatakse pingelamellplaadi konstruktiivset lahendust ning sellega kaasnevat puuduseid ning eeliseid. Teises peatükis selgitatakse katsekehade ehitamist ning kirjeldatakse kasutatavat katsemetoodikat. Seejuures antakse lühiülevaade Kullamaa poolt teostatud katsete ja meetoodika kohta ning kirjeldatakse autori poolt katsekehade taastamise käigus fikseeritud muutusi ajas (2018-2019). Kolmandas ehk viimases peatükis tuuakse välja autori poolt teostatud katsete tulemused ja võrreldakse neid omavahel.

1. KIRJANDUSE ANALÜÜS

1.1. Puit ehitusmaterjalina

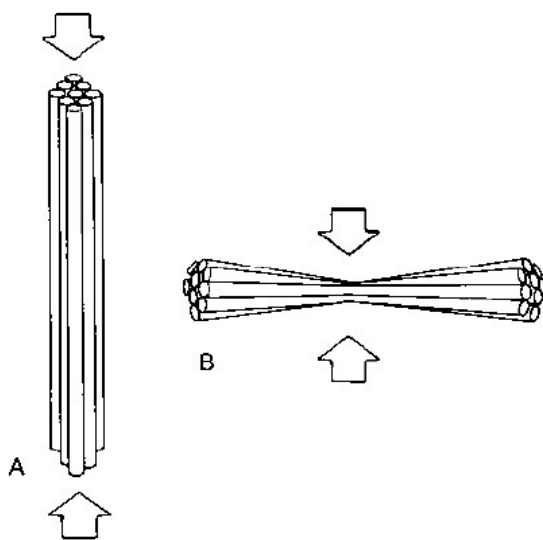
Puit on looduslik ja taastuv materjal (Just, E.-J. jt 2015: 21), mida kasutati ehituses juba kiviajal – arheoloogilistel väljakaevamistel on leitud puidust ehitisi isegi mesoliitikumi perioodist 9000–5000 a eKr (Just, E.-J. jt 2015: 12). Puidu kerge kaal, hea töödeldavus, aastaajast ja ilmastikust sõltumatus, ehitamise lihtsus ning suur tugevus mahukaalu kohta on juhtinud inimesi seda kasutama ehitusmaterjalina. Andmed näitavad, et puit kerkib ehitusmaterjalina esile kohtades, kus tugevuse ja kaalu suhe on oluline ning spetsialiseerunud arhitektuuri- ja inseneritöö tulemusel võib tulevikus see suhe veelgi paraneda (Ramage jt 2016: 333). Puit on vähetundlik keemiliste mõjutuste suhtes ning on väikese soojusjuhtivusega (Allikas, Kulbach 1962: 4).

Lisaks on üheks oluliseks plussiks ka see, et juba puidu tüvi ise moodustab valmis kandekonstruktsiooni – tala või posti (Allikas, Kulbach 1962: 3). Näiteks liimpuidust tala valmistamiseks kulub energiat kuus korda vähem kui samaväärse terasest ja viis korda vähem kui raudbetoonist tala valmistamise jaoks (Just, E.-J. jt 2015: 21). Seejuures on puit hoonete lammutamisel suuresti taaskasutatav, puidu säilivus ehituses on normaalse eksploatatsiooni puhul küllaltki suur (Allikas, Kulbach 1962: 4). Seega võib väita, et puitu töödeldeski (liimid, värvkatted) jääb ta loodussõbralikumaks materjaliks kui näiteks teras ja raudbetoon.

Puidu puudusteks võib aga lugeda materjali ortotroopsust – materjal omab erinevates suundades erinevaid omadusi (Just, E.-J. jt 2015: 15). Puit on materjalina ebaühtlane ning pideval koormamisel võivad puidus esile tulla küllaltki suured plastilised deformatsioonid. Lisaks esineb puitkonstruktsioonides kahjurite, mädanemise ja tulekahju oht (Allikas, Kulbach 1962: 4).

1.1.1. Okaspuidu struktuur

Okaspuidu torujas-kiulise ehitusega rakuseinte anisotroopse struktuuriga on määratud tema füüsilised ja mehaanilised omadused. Okaspuidule annavad mehaanilise tugevuse torukujulised rakud ehk trahheiidid, mis moodustavad puidu mahust rohkem kui 95%. Trahheiidide kaudu liigub elavas okaspuidus mahl. (Just, E.-J. jt 2015: 18-19) Tihedalt kokku pakitult moodustavad rakud ühtse süsteemi, mida on lihtne võrrelda joogikõrtega (joonis 1.1.). Ühtselt koos olles kaaluvad kõrred (puidurakud) vähe, kuid need võtavad pikisuunas vastu suuremat koormust kui ristsuunas koormates. Ristsuunas vajuvad kõrred (puidurakud) kokku üsna väikesel koormusel (joonis 1.1. B). (Ritter 1990: 3-2) Sellest tuleneb ka puidu võime võtta vastu suuremaid koormusi pikisuunaliselt (joonis 1.1. A).



Joonis 1.1. Puidurakkude võrdlus joogikõrtega. (A) Jõud mõjub pikisuunaliselt. (B) Jõud mõjub teljega ristsuunaliselt ning kõrred (puidu rakud) vajuvad mõjuva jõu tõttu kokku (Ritter 1990: 3-2).

Okaspuit koosneb malts- ja lülipuidust. Maltspuit on kasvav noor kiht, mis sisaldab elusrakke ja milles liiguvad mahlad. Lülipuit, mis annab puule vastupidavuse ja tugevuse, asub puu sisemistes kihtides ja see moodustub maltspuidu surevatest rakkudest. Lülipuidus ei voola mahlad, sest membraanid on kleepunud rakkude avauste ette. See on ka põhjuseks, miks okaspuitu on raske immutada, eriti kehtib see lülipuidulise kuuse kohta (Just, E.-J. jt 2015: 21).

1.1.2. Puidu füüsikalised omadused

Puidu tähtsamateks füüsikalisteks omadusteks võib käesoleva töö kontekstis pidada tihedust, niiskusesisaldust ja mahumuutust.

Puidu üheks oluliseks füüsikaliseks omaduseks on tihedus, mis on mahuühiku mass koos pooridega looduslikus olekus. Kuigi praktiliselt kõikidel puiduliikidel on ühesugune puitaine erimass ($1,54 \text{ g/cm}^3$), siis puidu tihedused on liigiti erinevad, mis tuleneb pooride mahu ja raku puitaine vahekorra tõttu. Kuna puidu tihedus sõltub ka niiskusesisaldusest, siis on kokku lepitud, et tiheduste väärtused esitatakse puidu 12% niiskuse juures. (Just, E.-J. jt 2015: 23)

Seos, millega määratakse tihedus (Just, E.-J. jt 2015: 23):

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.1.)$$

kus m – proovikeha mass, kg;

V – proovikeha maht, m^3 ;

ρ – puidu tihedus, kg/m^3 .

Mida vähem on puidus õõnsusi ehk poore, seda tihedam on puit. Mida suurem on puidu tihedus, seda suuremad on ka puidu (Saarman, Veibri 2006: 72) tugevus, kõvadus, kulumiskindlus, soojusjuhtivus, kütteväärtus, kahanemine ja paisumine.

Sillaehituse juures on puidu füüsikalistest omadustest olulisel kohal ka niiskusesisaldus, kuna sillad asuvad enamasti välitingimustes ehk kontrollimatus keskkonnas. Vastavalt puidu niiskusesisalduse muutumisele muutuvad ka puidu tugevusomadused. Samuti toob niiskusesisalduse muutumine kaasa puidu mahumuutused (Just, E.-J. jt 2015: 25), mis võivad viia omakorda ebasoovitavate sisemiste jõudude tekkimiseni konstruktsioonis. Näiteks võivad omavahel liiga tihedalt täissulundiga kokku liidetud puidust voodrilauad puidu niiskusesisalduse suurenedes soonest välja paisuda. Puidu niiskusesisalduse väljendamiseks on olemas järgmine seos (Just, E.-J. jt 2015: 24):

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_0}{m_0} 100, \quad (1.2.)$$

kus m_{ω} – puidust proovikeha mass enne kuivatamist;

m_0 – puidu proovikeha mass pärast püsiva kaaluni kuivatamist.

Puidus esineb vett kolmel erineval viisil: esimene neist on kapillaarvesi, mis täidab rakud ja sisemised tühikud rakkude vahel, teine on hügrokoopne vesi, mis imendub raku seintesse, ja kolmas on keemiliselt seotud vesi, mis on ainete koostises ning eraldub keemilisel töötlemisel (Just, E.-J. jt 2015: 25). Kuivatamisega eemaldatakse kapillaar- ja hügrokoopne vesi (Allikas, Kulbach 1962: 10). Puidu rakusein imeb endasse vett ainult teatud piirini, kuni ta niiskusest küllastub. Seda punkti nimetatakse küllastuspunktiks ning kõikidel puiduliikidel saabub see toatemperatuuril ca 30% niiskusesisalduse juures. Niiskuse suurenemisel koguneb liigne vesi juba raku õõnsustesse. (Saarman, Veibri 2006: 76)

Vee hulga suurenedes, kuni rakuseina küllastuspunktini, väheneb puidu tugevus kõige enam paindel ja survel, vähem nihkel ning eriti vähe löökoormusel ja tõmbel. Kui niiskusesisaldus jääb küllastuspunktist kõrgemale, siis jäävad puidu füüsikalised ja mehaanilised omadused püsima. Õhus leiduva veeauru tõttu on puidus alati niiskust, mille muutus toob kaasa mahumuutused puidus. Puit omandab pikalt ühes keskkonnas seistes tasakaaluniiskuse, mis tähendab, et aururõhud õhus ja puidu pinnal on võrdsed (Just, E.-J. jt 2015: 25).

Niiskus eraldab puidurakke üksteisest ning seetõttu nõrgeneb ka nendevaheline side ning niiske puit on alati kuivast nõrgem (Just, E.-J. jt 2015: 25). Kuna niiskus mängib puidu kasutuse puhul olulist rolli, siis jagatakse puit erineva niiskusesisalduse järgi järgnevalt (Saarman, Veibri 2006: 107):

- 1) mööblikuiv puit 6...10%;
- 2) tiserikuiv puit 10...15%;
- 3) liimimiskuiv puit 14%;
- 4) hõõveldamiskuiv puit 15...19%;
- 5) õhukuiv puit 15...23%.

Ehituskonstruksioonides ei tohi kasutada toorest puitu, mille niiskusprotsent on suurem kui 25%. Ehitusel kasutatava puidu niiskus peab olema üldjuhul vahemikus 8...15%. (Just, E.-J. jt 2015: 26). Puit on hügrokoopne materjal – niiskes keskkonnas hakkab kuiv puit endasse niiskust imema ning kuivas keskkonnas ära andma (Allikas, Kulbach 1962: 10). Puidu niiskuspaisumine või kuivamiskahanemine toimub niiskuse muutumisel 0...28%. Kõigis suundades puit ühtemoodi ei deformeeru. Täielikul kuivamisel on okaspuidu

pikisuunaline lühenemine 0,1...0,4%, ristikiudu radiaalsuunas 4,4...5,3% ja tangentsiaalsuunas 9,6...10,4%. (Just, E.-J. jt 2015: 26)

Järgmine puidu füüsikaline omadus on temperatuuripaisumine, mis toimub puidus igas suunas. Soojusega puit paisub ja külmaga tõmbub kokku. Kuna puit on hea soojusisolaator, siis ta ei reageeri kiiresti temperatuuri muutustele keskkonnas. (Ritter 1990: 3-13) Puitkonstruktsioonides ei arvestata temperatuuripingeid ega tehta ka temperatuurivuuke, sest puidu temperatuuripaisumise tegur on väike, mis on pikikiudu $(3...5) \cdot 10^{-6}$ ning ristikiudu eelnevast 7 korda suurem (Just, E.-J. jt 2015: 27). Samuti väidab ka Ritter (1990: 3-13), et puidust sillakonstruktsioonide puhul pole temperatuuripaisumine ning -kahanemine arvestatav.

1.1.3. Puidu mehaanilised omadused

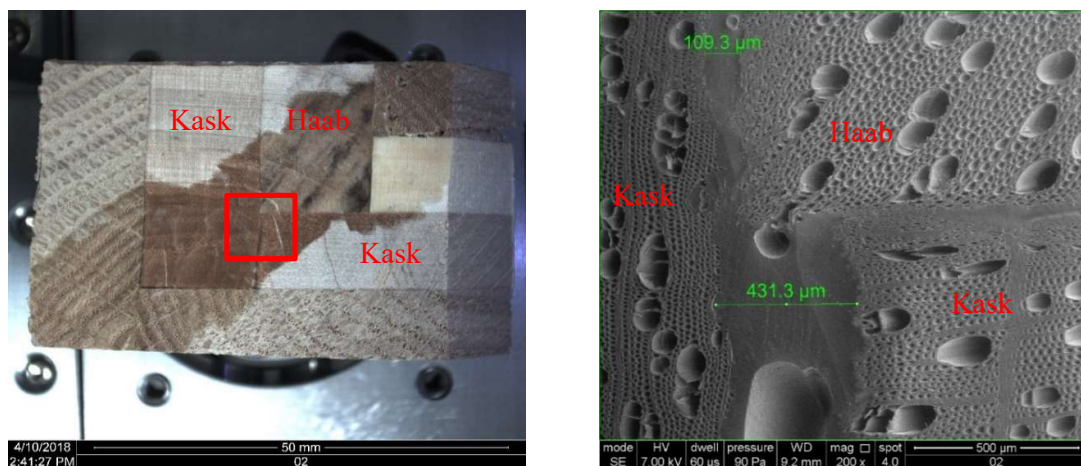
Puidu peamiste mehaaniliste omaduste hulka antud töö kontekstis võib lugeda kestustugevuse ja puidu tugevusomadused (tõmme, surve, nihe, paine). Puidul on võime välisjõudude mõjul deformeeruda ning pärast mõjude lakkamist oma esialgne kuju taastada (Saarman, Veibri 2006: 134). Seda näitab deformatsiooni kadumine. Puidu elastsus sõltub puuliigist, tihedusest, niiskusesisaldusest ning koormuse rakendamise suunast kiudude suhtes (Saarman, Veibri 2006: 135). Mida suurem on niiskusesisaldus puidus, seda elastsem on puit. Näiteks annab niiskemat puitu rohkem painutada, enne kui rakustruktuur puruneb. Lisaks on oluline märkida, et puidul on eri suundades erinevad omadused. Puidul on suurim tugevus, kui jõud mõjuvad pikikiudu ning väikseim, kui jõud mõjuvad ristikiudu tangentsiaalsuunaliselt (Just, E.-J. jt 2015: 29). Näiteks puidul tugevusklassiga C24 on normatiivne tõmbetugevus pikikiudu $14,5 \text{ N/mm}^2$ ning ristikiudu $0,4 \text{ N/mm}^2$ (EVS-EN 338:2016). Puidu survetugevus pikikiudu ja ristikiudu on vastavalt 21 N/mm^2 ja $2,5 \text{ N/mm}^2$ (EVS-EN 338:2016).

Mida kauem puitu koormata, seda vähem koormust jõuab puit vastu võtta, kuni teatud piiril saabub kestustugevus. Eksperimentaalselt on selgitatud, et kui puidust katsekehade koormamise aega pikendada, siis puidu tugevus väheneb pidevalt, lähenedes asümptootiliselt teatud piirväärtusele, mida nimetatakse puidu kestustugevuseks (Just, E.-J. jt 2015: 28). Lühiajalisel koormamisel säilitab puit elastsuse ning konstruktsioonides tekivad

suhteliselt väikesed ja suures osas taastuvad deformatsioonid (Just, E.-J. jt 2015: 30). Kui koormatud puittalalt eemaldada kaua mõjunud välisjõud, võib määrata tala jaoks kolm erinevat läbipainde taastumise nivood: esimene neist on elastne taastuv deformatsioon, teine on ajast sõltuv veniv-elastne deformatsioon ning kolmas on plastne jäävdeformatsioon. Puidul on reoloogilised¹ omadused, mis tähendab puidu kui materjali puhul, et kui seda pikaajaliselt koormata, siis säilib vaid 60% selle algsest tugevusest. (Saarman, Veibri 2006: 155)

Nagu kõikidel konstruktsioonimaterjalidel, on ka puidu puhul probleemiks roome – materjali omadus jätkuvalt plastselt deformeeruda jõudude mõjul, mis on väiksemad kui muidu plastset deformatsiooni esile kutsuvad jõud (Just, E.-J. jt 2015: 31). Tärno (2003: 50) nimetab materjalide roomamiseks omadust järeldeformeeruda kestvate koormuste all pikema aja vältel. Lihtsalt öeldes tähendab see seda, et puit väsib ära. Roome tekib aeglaselt ja püsivalt, kuid suureneb temperatuuri ja niiskuse kasvades (Ritter 1990: 3-32). Kui puidule anda kindel deformatsioon eelpingestuse näol, siis pinge aja jooksul väheneb, tekib relaksatsiooni nähe ehk pingete järk-järguline vähenemine konstruktsioonis jääva deformatsiooni korral (Just, E.-J. jt 2015:31).

Väsimuspurunemise korral puidu rakud purunevad. Survel ristikiudu toimub rakkudes väsimuspurunemine rakkude kokkusurumise näol (joonis 1.2.). (Smith jt 2003: 147)



Joonis 1.2. Vasakul puitlamellidest kokku liimitud katsekeha, paremal elektronmikroskoobi suurendus: liimikihi vahetus läheduses kokku surutud puidurakud (Teppand jt 2018).

¹ Reoloogiaks nimetatakse materjali omaduste sõltuvust erinevatest pingetest, deformatsioonidest ning ajast (Saarman, Veibri 2006: 155).

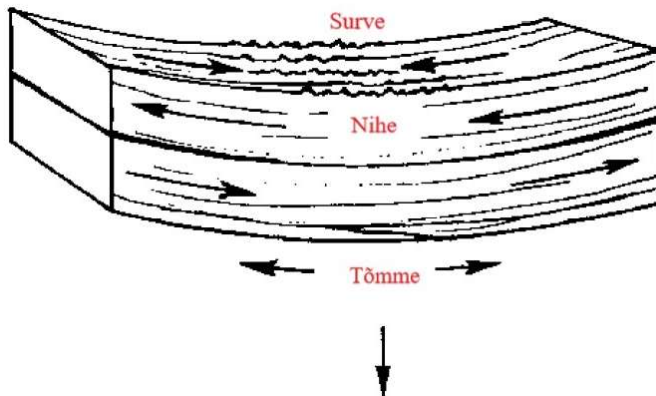
Antud uurimuse käigus läbiviidavate katsete käigus on puidu väsimuspurunemisel ristikiudu oluline roll, kuna katsekehades kasutatakse kiilukujulisi lamelle, mis koormuse rakendamisel üksteise suhtes kokku surutakse.

Tugevusomadused näitavad materjali vastupanuvõimet rakendavatele koormustele. Nende hulka kuuluvad näiteks tõmme, surve, nihe ja paine. (Ritter 1990: 3-19)

Puidul, mis töötab tõmbele, puuduvad plastsed deformatsioonid. Puidu mittehomoogeensusest tingituna esineb elemendi ristlõikes sisemine ekstsentrilisus ning toimub habras purunemine, kuna puidukiud purunevad järk-järgult. Puidu looduslikud vead vähendavad oluliselt puidu tõmbetugevust, eriti suurt rolli mängivad selles oksad. Näiteks, kui oksa läbimõõt moodustab elemendi küljepikkusest $\frac{1}{4}$, siis selle ristlõike tugevusnäitaja on vaid 27% standardse proovikeha tugevusest. Ristikiudu on tõmbetugevus 20...25 korda väiksem kui tõmbetugevus pikikiudu. (Just, E.-J. jt 2015: 31)

Pikikiudu on raketeta puidu tõmbetugevus umbes pool samasuunalise survetugevuse väärtusest. Kui tõmbepinge puhul rebitakse kiud katki, siis survepinge korral kiud painduvad ning nihkuvad kõrvale. Tekib ca 45° nurga all liugpind, mille moodustavad väändekohad. Näiteks pikikiudu on kuuse survetugevus ca 45 N/mm² ning ristikiudu on survetugevus 5...6 korda väiksem kui pikikiudu. (Saarman, Veibri 2006: 140) Mida suurem on puidu tihedus, seda suurem on selle survetugevus. Survet ristikiudu nimetatakse muljumiseks. Mida väiksem on muljutava pinna ja kogu pinna suhe, seda suurem on puidu muljumistugevus (Just, E.-J. jt 2015: 33).

Okaspuidul tugevusklassiga C24 on temperatuuril 20 °C ning niiskusesisalduse 12% juures normatiivne paindetugevus 24 N/mm² (EVS-EN 338:2016). Kui näiteks puidus on oksad läbimõõduga $d=1/3$ küljepikkusest, siis tugevus väheneb umbes poole võrra (Just, E.-J. jt 2015: 35). Kuna puit puruneb paindele töötades tõmbetsoonist, siis tuleb jälgida, et vähem vigastusi satuks tõmbetsooni (joonis 1.3.).



Joonis 1.3. Vertikaalse koormuse korral tekitavad paindepinged puitelemendis nulljoonest ülevalpool surve- ja allpool tõmbepinged. Lisaks tekib horisontaalne nihkejõud ning vertikaalne läbipaine (Ritter 1990: 3-22 - autori tõlgitud joonis).

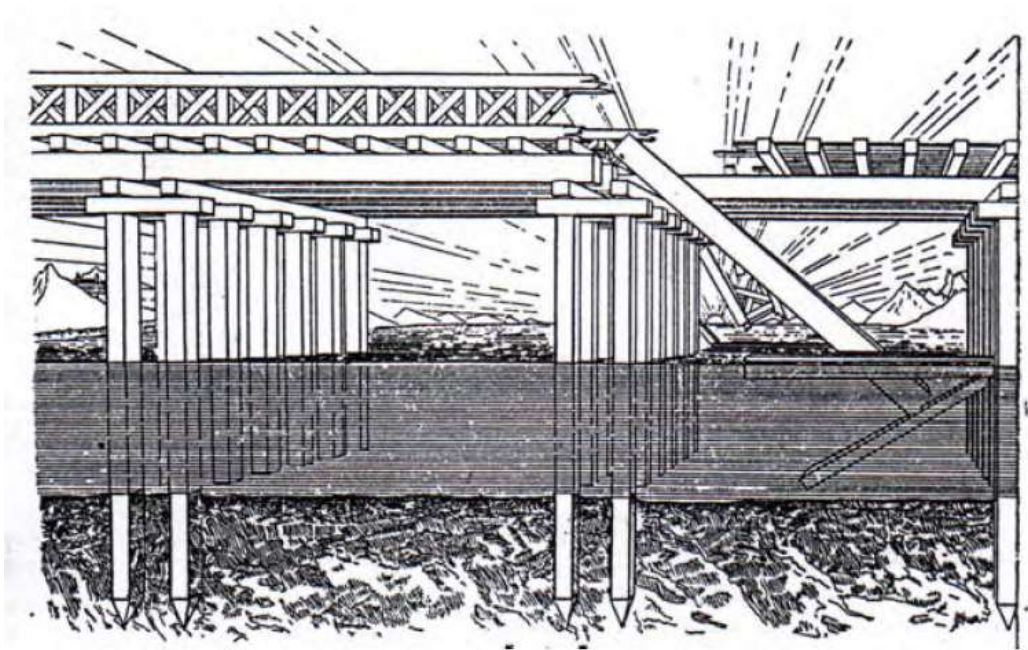
Katsete teel on okaspuidu lõiketugevuseks standardsete katsekehade puhul pikikiudu saadud keskmiselt $\tau_v = 7 \text{ N/mm}^2$ (Just, E.-J. jt 2015: 35). Kui keha pindasid mõjutavad välisjõud ning need nihutavad kihte paralleelselt teineteise suhtes üksteisest eemale, siis tekivad nihkepinged (Saarman, Veibri 2006: 145). Kõige olulisem nihkejõud puidus on kiududesuunaline horisontaalne nihe, mis tekitab puidurakkude pikisuunalise liikumise ja eraldumise ning mis omakorda lõhub rakuseinad ja puidu struktuuri (Ritter 1990: 3-21).

1.2. Puitsillad

1.2.1. Puit sillamaterjalina läbi aegade

Iidsed puitsillad ei ole tänapäevani säilinud, sest enamus neist on ammu hävinenud sõdade, looduskatastroofide või ootamatute tulekahjude tagajärjel. Info, mis on tänapäeval vanade sildade kohta teada, näitab seda, et ehitajad pidid väga hästi tundma erinevate puiduliikide omadusi ning teadma, kuidas neid ehitistes parimal moel kasutada (Partov 2016: 94).

Vana-Rooma perioodil ehtasid roomlased puidust lihtsamaid sildu. Need koosnesid puutüvedest välja raiutud taladest, mis asetsesid omakorda puidust vaiadel (Partov 2016: 97). Teadaolevalt esimeseks roomlaste poolt ehitatud sillaks peetakse *Pons Sublicius*, mis ehitati aastatel 660–616 a eKr (joonis 1.4.) (Kuklik 2008: 10).



Joonis 1.4. Sild *Pons Sublicius* (Kuklik 2008: 10).

Allikas ja Kulbach toovad samas välja (1962: 3), et esimesteks suuremateks roomlaste ehitatud puitkonstruktsioonideks olid sild Roomas Tiberi jõel, mis ehitati 630 a eKr ning Caesari käsul tehtud 500-meetri pikkune puidust sild Reini jõel, mis ehitati 1. sajandil e.m.a.

Traianuse sambal on kujutatud 1. sajandil pKr valminud kolmandat suuremat Rooma perioodist pärinevat puidust kaarsilda üle Doonau jõe (joonis 1.5.). Silla pikkuseks oli üks kilomeeter ning see toetus 20 kivisambale, mille 35-meetrised avad olid sillatud puitkaartega (Just jt 2015: 12). Kuklik (2008: 11) kirjutab aga, et silla puitkaared sildasid 52-meetriseid avasid.



Joonis 1.5. Traianuse sild (Kuklik 2008: 11).

Iidsetel kreeklastel olid põhilisteks sillatüüpideks kivisammastel asuvad sillad, mille tekki kandsid kas puidust või kivist talad. Sillatekid koosnesid kas puidust või kiviplaatidest, samas otstarbekamateks peeti puidust tekikandureid, sest sellist silda oli sõjalise ohu korral lihtsam lammutada. Samuti ehitati ka puidust vaiadel asetsevaid sildu, mille tekki kandsid puidust talad. Heaks näiteks on kreeklaste poolt ehitatud *Amphipolise* sild. Silla kohta on teada info, et seda kasutati 422 a eKr spartalaste ja ateenlaste vahelises sõjas. Väljakaevamiste käigus on selgunud, et sild koosnes puidust vaiadest ning taladest. (Partov 2016: 95–97)

Üks esimesi sõrestiksildu ehitati Itaalia arhitekti Andrea Palladio kavandi järgi Kirde-Itaalias 1550. aastal (Kuklik 2008: 11). Tänapäeva Euroopas on üheks vanimaks sillaks Šveitsis asuv *Kappelbrücke* (joonis 1.6.) (Kuklik 2008: 11). See ehitati 1333. aastal ning aja jooksul on seda silda korduvalt ümber ehitatud. Silla kanduriteks on puittalad, mis asuvad puidust vaiadel (Kuklik 2008: 12). Sillal on peal katus, mis kaitseb seda ilmastikuolude eest ja suurendab nii oluliselt puidust sildade kasutusiga.



Joonis 1.6. Kappelbrücke sild (Kuklik 2008: 12).

Üheks heaks näiteks silla mudeli katsetamise kohta on I.P Kulibini projekt 298-meetrise sildeavaga puidust kaarsilla Neeva jõe ehitamiseks (Allikas, Kulbach 1962: 3). Selle projekti järgi ehitati kümme korda väiksem mudel, mida 1776. aastal edukalt katsetati (Allikas, Kulbach 1962: 3). Kahjuks täismõõtmelises silda Neeva jõe ei ehitatud, kuid see näide annab ülevaate, et väiksemaid sillamudeleid on ajaloos varemgi katsetatud.

Ka tänapäeval rajatakse puidust nii jalakäijate- kui maantee sildu. Puidu eelisteks sillaehituses on vastupidavus külmumis- ja sulamisprotsessidele, kemikaalidele ja dünaamilisele koormamisele. Puidu peamisteks puudusteks sillaehituses võib pidada oskamatu ehitustööd, niiskuskaitse puudumist või selle vähest efektiivsust ja silla ebapiisavat hooldust, mille puhul võib tekkida pehastumisoht (Just, E.-J. jt 2015: 371). Nüüdisajal ehitatakse puidust erinevaid sillatüüpe, näiteks tala-, raam-, kaar-, sõrestik-, ripp- ja vantsildu. Tänu liimpuidu kasutuselevõtule on võimalik sillata puiduga järjest suuremaid sildeid, mis on oluliselt suurendanud puidu kasutuselevõttu sillaehituses. Näiteks Skandinaavias on alates 1990. aastast alates ehitatud üle 1000 uue puitsilla (Just, A. jt 2015: 5).

1.2.2. Puitsildade konstruktiivsed tüübid

Kuna puit võtab oma kaalu kohta vastu suurt koormust, siis on ta väga sobilik materjal sildade ehitamiseks. Puidust sobib ehitada nii jalakäijate kui ka maanteed sildu. Puidust sildu ehitatakse tänapäeval tihti tänu puitmaterjali madalatele ehituskuludele, kiirele valmimisele ning keskkonnasõbralikkusele. (Pousette 2016: 293)

Sildade puhul on nende ajutine koormus liikuv ja dünaamiline. Inimeste ja masinate sillal liikumisel tekitatud vibratsioonist tekivad konstruktsioonis dünaamilised jõud, mis on suuremad kui sama jõuga staatilised koormused. (Ritter 1990: 6-21) Eriti oluline on vibratsioon Pousette (2016: 296) sõnul jalakäijate sildade puhul, kuna nii horisontaalne kui ka vertikaalne vibratsioon võib jalakäijatele mõjuda hirmutavalt ning tekitada neis ohutunde. Pousette (2016: 296) väidab, et puidust jalakäijate sildade puhul ei ole konstruktsiooni väsimus tavaliselt määravaks saav ning seda tavaliselt ka ei kontrollita.

Puidust sillad jagunevad Pousette (2016: 294-295) jaotuse järgi kolmnurksõrestik-, raam-, sõrestik-, kaar-, vant- ja rippildadeks. Just, E.-J. jt (2015: 373) jaotab puidust sillatüüpideks eraldi veel ka plaat- ning riivtugistikisilla. Silla konstruktsioon koosneb peakanduritest, neid ühendavatest sidemetest, tekikonstruktsioonist ning tugedest (Just, E.-J. jt 2015: 373).

Talasillad on vanimad ning oma ehituselt kõige lihtsamad. Sild koosneb vertikaalsetest tugedest ning horisontaalsetest taladest, mis sildavad avausi (Balasubramanian 2017: 4). Näide talasilla kohta (joonis 1.7.) jalgteesilla näol. Silla peakandurid on liimpuidust talad, mis kannavad immutatud kuusepuidust koosnevat sillatekki (Just, A. jt 2015: 115). Talasillad on sobilikud enamasti lühikeste sillete sildamiseks, mis on ka üheks nende kõige suuremaks miinuseks. Kõige suuremaks talasildade plussiks on nende ehitamise lihtsus ning sellest tulenevalt ka odavus. Talasildades mõjuvad jõud nagu tavalises lihttalas. Ülemises kihis tekivad surve- ning alumises tõmbepinged. (Balasubramanian 2017: 4) Puitu saab panna hästi talana tööle, sest võrreldes betooniga, millel on küll suur survetugevus, tõmbele ta hästi ei tööta. Puit seevastu toimib hästi nii tõmbel kui survele.



Joonis 1.7. Nuutri jalgteesild (Just, A. jt 2015: 115).

Sõrestiksildade sõrestikud on tänapäeval enamasti tehtud liimpuidust (joonis 1.8.). Sõrestikud võivad asuda kas sillatekist all või üleval pool. (Pousette jt 2017: 50) Sõrestiksilla üheks eeliseks kaarsilla ees on see, et tugelele ei teki suuri horisontaalseid toereaktsioone (Bell 2008: 216). Sõrestiksildades on väga palju ühenduskohtasid, mis on olulised silla tugevuse, jäikuse ja kestvuse osas (Pousette 2016: 295). Sõrestikud koosnevad tavaliselt ülemisest ja alumisest vööst ning postidest ja diagonaalsidemetest. Ülemine vöö töötab survele ning alumine tõmbele. Postid ja diagonaalid töötavad kas tõmbele või survele.



Joonis 1.8. Liimpuidust kolmnurksõrestiksild Vihantasalmi, Soomes Mäntyharjus (Bell 2008: 212).

Raamsillad on oma tüübilt vanad ehituskonstruksioonid, millel on sillateki all diagonaalid, mis töötavad survele. Diagonaalide abil viiakse sillatekist või taladest tulenev koormus madalamal asuvatele tugelele. (Pousette 2016: 294-295)

Kaarsildade peakanduriteks on kaared ning need on enamasti tehtud liimpuidust (joonis 1.9.). Silla kaared võivad paikneda sillatekist nii allpool kui ka kõrgemal. Kui kaared asuvad sillatekist üleval pool, siis tavaliselt on sillatekk riputatud tõmbidega peakandurite

külge. (Pousette 2016: 295) Kui silla kaared asuvad sillatekist allpool, siis kantakse sillatekist tulenev koormus peakandurile survele töötavate postidega (Bell 2008: 214). Kui silla peakandurid ehk kaared asuvad sillateki all, siis võrreldes sillatekis üleval pool asuvate kaartega, on olulisteks eelisteks see, et kaared on kaitstud ilmastiku eest. Seda tänu sellele, et kaared on sillateki all sademete eest varjul ning lisaks on lihtsam tagada konstruktsiooni jäikus (Bell 2008: 214). Sildadel, mille kaared on paigutatud sillatekist kõrgemale, on probleeme jäikuse tagamisega (Bell 2008: 214). Kaarsildades tekivad suured horisontaalsed toereaktsioonid ning seetõttu vajavad need massiivseid vundamente (Pousette jt 2017: 51). Kui sild on ehitatud pehmesse pinnasesse, siis on sillatekk tihti pandud vastu võtma horisontaalseid koormuseid (Lin, Yoda 2017: 20).



Joonis 1.9. Liimpuidust kanduritega *Tynset* kaarsild Norras (Bell 2008: 213).

Puidust vant- ja ripp sillad koosnevad tavaliselt puidust sillatekist, mida kannavad vantsildade puhul terasest tõmbid ning ripp sildadel terastrossid. Neid ehitatakse enamasti jalakäijatele. Terastrossid ning vandid kinnituvad tavaliselt silla püloonide külge. (Pousette 2016: 295) Antud sildades kasutatakse materjale ära väga efektiivselt, kuna enamasti töötavad sildade elemendid nagu vandid ja trossid tõmbele ning postid ja püloonid survele (Lin, Yoda 2017: 24-25). Heaks näiteks puidust tekiga vantsillast on kurikuulsaks saanud Vaida jalakäijate sild, mis asus Tallinna-Tartu maanteel, kuid on kahjuks tänaseks ümber ehitatud terastaladele ning puidust sillatekki asendab raudbetoon.

1.2.3. Puitsildade ajalugu Eestis

Eesti sillaehituse algusaegade kohta on andmed lünklikud ja juhuslikud (Matve 2004: 11). Matve (2004: 12) tõdeb, et väheste andmete tõttu võib Eesti sillaehituse kohta enne 18. sajandit teha vaid oletusi. Läti Henriku kroonikas mainitakse sildu, mis viivad linnustesse, kuid Matve (2004: 11) arvates on need üle soolade viivad sillad.

Kui Põhja-Eestis on olnud heaks sillaehitusmaterjaliks paas, siis Lõuna-Eestis paas puudub. Raudkivi oli sillaehituseks raskesti töödeldav ning sellest tulenevalt kasutati Lõuna-Eestis sillaehitusmaterjalina peamiselt puitu. Üheks huvitavaks sillaehituse viisiks, mida on Eestis kasutatud, on kastsammastel sillad. Need töötasid põhimõttel, et kinnised palkidest ristnurgaga kastid täideti kividega ning lasti põhja. Kastidest moodustusid sillasambad. Lisaks kastsammastele on kasutatud maantee ületamiseks veel ka parvi. Isegi pärast Teist maailmasõda oli Eestis maanteeülesõite parvedel. (Matve 2004: 11-12) Tänapäeval on üks selline uuesti kasutusel Kavastus, üle Emajõe.

Kuna kivisillad ilmusid Eestimaa teedele alles 19. sajandil, siis võib arvata, et Kuressaare Suursild oli esialgu ehitatud puidust. Pole teada, millal esimene sild rajati, kuid 1650. aastal tehti raele korraldus parandada lagunenud „pikk sild“. Esimene puitsild, mille kindel ehitusaeg on teada, on Narva puitsild. See ehitati aastatel 1822–1829 insener Bulmeringi poolt. Sild koosnes viiest võrdsest avast, mida sildasid puidust kaared sildega 23,7 m. Silla puidust kaared koosnesid puitprussidest ning kalda- ja jõesambad ehitati vaialustele, mis tehti paekivist ning laoti lubimördiga. Teise maailmasõja käigus sild purustati. (Matve 2004: 13-22)

1960. aastatel viidi Eesti NSVs läbi „Puitsildade likvideerimise programm“. See vähendas puitsildade arvu 80%-lt 2%-ni. Tänapäeval on Eestis hakatud uuesti puidust sildu ehitama. Tagavere sild üle Taebla jõe oli esimene sild üle 40-aastase pausi järel, mis on ehitatud maanteele. (Leet 2015) Kuna Eestis pole puitsildu kaua ehitatud, puuduvad tänapäeval ka kogemused ning oskused nende ehitamiseks. Negatiivsed kogemused, näiteks Vaida jalakäijate silla varing kuus aastat pärast silla ehitamist, on tekitanud palju kõneainet ning tõstnud umbusaldust puidu kui sillaehitusmaterjali vastu.

Vaida puitsilla varingu peamiseks põhjuseks peetakse halvasti ehitatud konstruktiivset kaitset vee eest. Sademevesi pääses silla jäikustalade ning tekiplaadi prusside vahele, kust ei olnud veel enam võimalik välja kuivada. Pikaajase kõrge niiskusesisalduse tõttu puit pehastus ning konstruktsioon lagunes (joonis 1.10.). (Perv, Sinisalu 2015: 60) See kõik viitab jällegi sellele, et puuduvad kogemused ning juhendid puitsildade ehitamiseks. Ka Martti Kiisa (Leet 2015) kinnitab, et Eestis puudub korralik juhendmaterjal puitsildade ehitamiseks. Üle Euroopa olevate eurokoodeksite näol on olemas küll üldised juhendmaterjalid ristlõigete ja muu dimensioneerimiseks, kuid puuduvad normdokumendid, kuidas puitsildu niiskuse eest kaitsta. Eesti puidust sildade puhul puudub konstruktiivne kaitse – ei osata korralikult teha hüdroisolatsiooni ülespööordeid ning on kohad, kust vesi saab liikuda konstruktsioonide vahele nii, et see enam välja ei kuiva. Naaberriikide kallis praktika on selline, et konstruktiivseid osasid kaitstakse odavamate materjalidega, mida teatud aja tagant välja vahetatakse. (Leet 2015)



Joonis 1.10. Vaida jalakäijate silla lagunenud tekk (Leet 2015).

Uuringu “Põhjamaades kasutatud puitsildade lahendused ja erinevate konstruktiivsete lahenduste vastupidavuse teadusanalüüs koos kasutusettepanekutega Eestis” lõppraportis (Just, A. jt 2015: 253) väidetakse, et puitsildade ehitamisel Eestis peaks rohkem tähtsustama puidu liigi valikut ning sügavimmutuse vajalikkust. Raportist selgus, et sildade hooldus ning inspekteerimine on Eestis puudulik ning sellest tulenevalt on mitmed probleemid kandekonstruktsioonides jäänud avastamata. Põhjuseks peetakse kogemuste ning selgete reeglite puudumist. Alternatiivina komposiit- ning betoonsildadele peetakse puitsildu üldjuhul odavaimaks elukaarekulude võrdluse põhjal. (Just, A. jt 2015: 253)

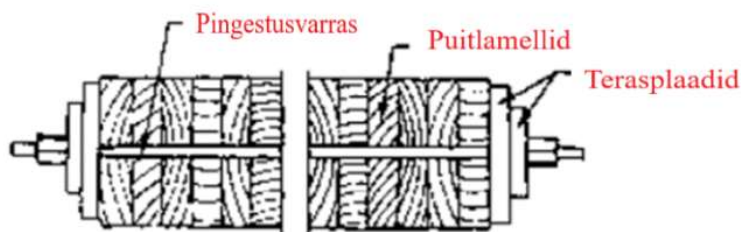
1.2.4. Pingelamellplaadist sillatekkide ajalugu

Esimesed sillatekiplaadid olid naellamellplaadid, millest kõige esimene plaat töötati välja 1976. aastal Ontarios Kanadas. Tsükliliste koormuste ja niiskuse mõjul tulid naelad välja ning plaat lagunes, kuna kadus hõõrdejõud lamellide vahel. Sellest arenes välja 1980. aastatel pingelamellplaadist sillatekk. Esimesed pingelamellplaadist sillatekid ehitati USA-s 1980. aastate lõpul. Pärast seda on seal ehitatud hulgaliselt pingelamellplaadist sillatekkidega sildu, peamiselt madala liikluskooormusega maanteedel, millel on vaja sillata väikeseid sildeid. (Ritter jt 1995: 348)

Pingelamellplaadist sillatekkidega sildu on 1990. aastatel ehitatud Austraalias R&D programmi raames, mille eesmärk oli tuua Põhja-Ameerikast ja Euroopast sisse tehnoloogia, ehitada valmis 40 silda ning hiljem neid uurimise eesmärgil testida ja jälgida (Crews 2015: 14). Samuti on ehitatud Põhjamaades mitmeid sildu, kasutades eelpingestatud tekiplaati (Just, A. jt 2015). Tänapäeval kasutatakse pingelamellplaate nii jalakäijate- kui ka suurte maantesildade konstruktsioonides (Just, E.-J. jt 2015: 374).

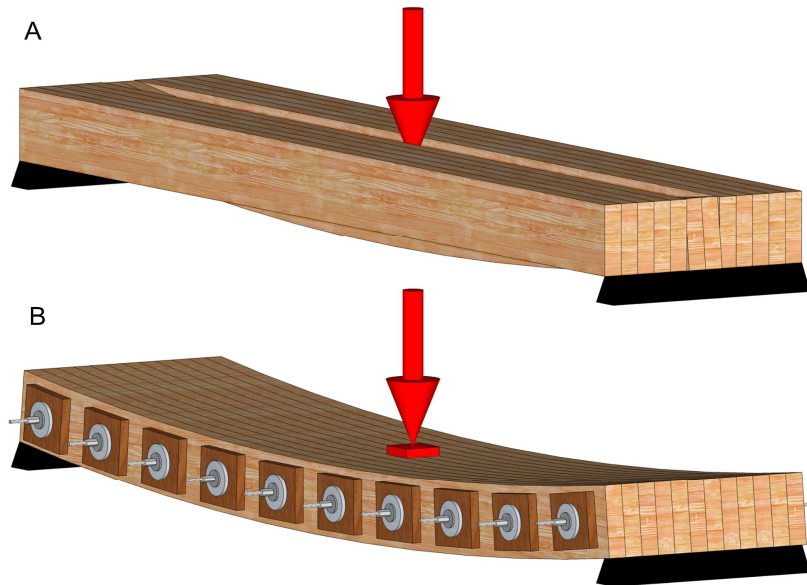
1.2.5. Pingelamellplaadist sillateki konstruktsioon

Pingelamellplaat koosneb prussidest, mis on omavahel terasvarrastega pingestatud (joonis 1.11.) (Just, E.-J. jt 2015: 374). Pingestamine paneb lamellid omavahel hõõrdejõul tööle ning sellistelt moodustavad need ühiselt töötava plaadi (Massaro, Malo 2014). Standardi EVS-EN 1995-2 (2007: 12) järgi koosnevad lamell-tekiplaadid hõõveldatud või saetud pinnaga lapiti külgnevatest lamellidest.



Joonis 1.11. Eelpingestatud pingelamellplaadi lõige (Ritter 1990: 2-23 – autori poolt tõlgitud tekstiga joonis).

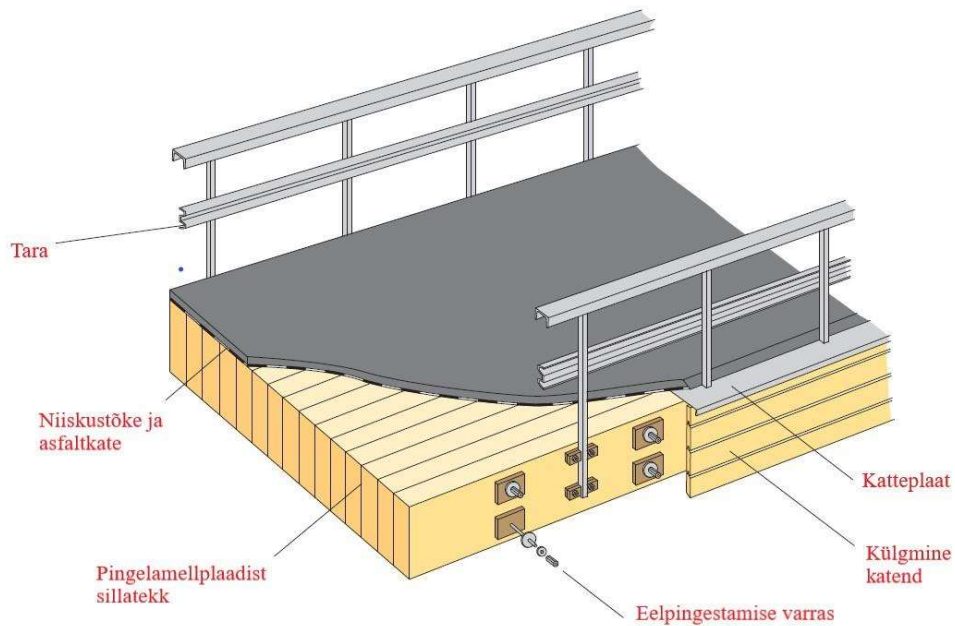
Pingelamellplaadi tööpõhimõte seisneb selles, et koondatud koormus jaotatakse hõõrdejõu abil kõrval olevatele lamellidele, mis kõik töötavad omakorda taladena. Kui hõõrdejõudu lamellide vahel ei oleks, siis võtaks koondatud koormuse vastu üks lamell (joonis 1.12.). (Ekholm 2013: 8)



Joonis 1.12. Koondatud jõu mõjumine eelpingestamata ning eelpingestatud taladele. (A) talad pole omavahel eelpingestatud. (B) talad on omavahel eelpingestatud (Ekholm 2013: 8).

Pingelamellplaadi pikaajaline eelpingestusjõud peab olema piisavalt suur, et ei toimuks lamellide vahelist nihet. Kui on täidetud tingimused, et algne eelpinge on vähemalt $1,0 \text{ N/mm}^2$, eelpingestamise aegne lamellide niiskusesisaldus ei ole suurem kui 16% ja tekiplaadi kasutusaegsed niiskusesisalduse muutused on hüdrolatsiooniga piiratud, siis peaks eeldama eelpingest tuleneva pikaajalise jääksurvepinge suuremaks kui $0,35 \text{ N/mm}^2$. (EVS-EN 1995-2:2007: 23) Eelpingestusjõu tagamine on üks olulisemaid asju pingelamellist sillateki konstruktsiooni puhul (Ritter 1990: 9-10).

Enamasti on sillatekid kaetud hüdrolatsioonist kihiga, mille peal on asfaltkate. Hüdrolatsioon koos asfaltkattega kaitseb sillatekki pealpoolt ilmastikumõjude eest ning kui ka sillateki küljed on voodriga kaetud, on sillatekk paremini kaitstud. Lisaks on sillatekkidele ehitatud puidust või metallist piirded. Näide pingelamellplaadist sillatekist on joonisel 1.13. (Pousette 2016: 298)



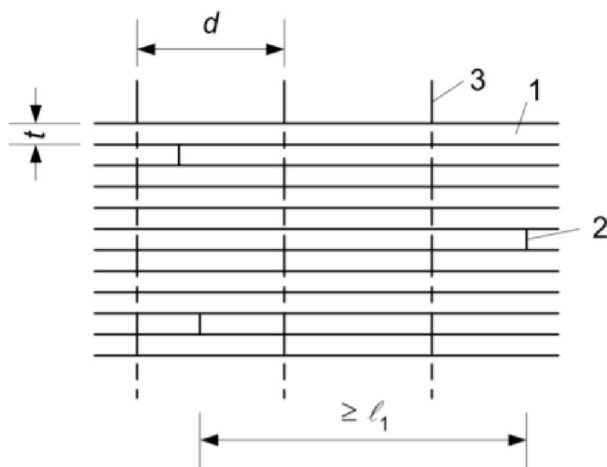
Joonis 1.13. Pingelamellplaadist sillatekiga sild (Pousette 2016: 299 – autori poolt tõlgitud tekstiga joonis).

Tänu otsliidetele on võimalik suurendada pingelamellplaadi sildeava. See on suur eelis, kui kasutatakse saematerjali, mille pikkused on tavaliselt kuni 6 m. Otsliidete kasutamine sillatekis aga vähendab sillateki tugevust. (Ekholm 2013: 10) Standardi EVS-EN 1995-2 (2007: 23) kohaselt ei tohiks otsliidete arv pikkusel l_1 olla üle ühe iga nelja üksteisega külgneva lamelli kohta (joonis 1.14.).

Pikkus l_1 määratakse valemiga (EVS-EN 1995-2: 2007: 23-24):

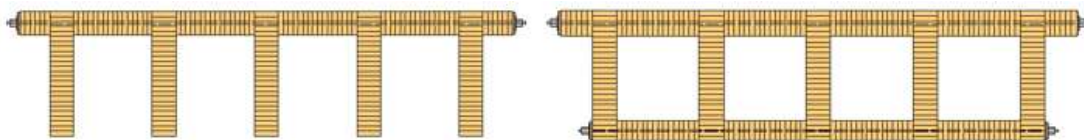
$$l_1 = \min \begin{cases} 2d \\ 30t \\ 1,2 \text{ m} \end{cases} \quad (1.3.)$$

kus d – on eelpingestuselementide vaheline kaugus;
 t – lamelli paksus eelpingestusjõu suunas.



Joonis 1.14. Otsliidet pingelamellplaadis, kus number: 1 tähistab lamelli, 2 otsliidet ning 3 eelpingestuselementi (EVS-EN 1995-2:2007: 24).

Pingelamellplaadist sillatekkide plussideks on nende ehitamise lihtsus, hea koormuse jaotus ning otsliidete kasutamise võimalus (Pousette 2016: 299). Lisaks tavalistele tekiplaatidele on kasutuses veel ka T-tala ning karptala tekikonstruktsioonid, mida kasutatakse suuremate sillete sildamiseks (joonis 1.15.).



Joonis 1.15. Vasakul pool T-tala ning paremal karptala tekikonstruktsioon (Pousette 2016: 301).

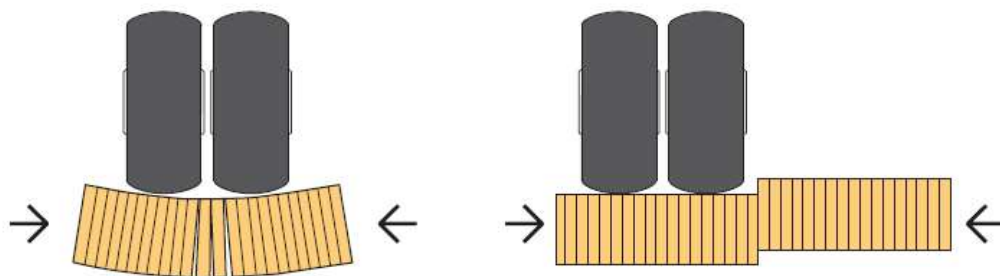
Antud tekikonstruktsioonid kinnitatakse tugelede liigenditega. Sillakonstruktsiooni kogupaksus suureneb T-tala ning karptala tekisüsteeme kasutades oluliselt. (Pousette 2016: 301)

1.2.6. Pingelamellplaadist sillatekiga kaasnevad probleemid

Kuigi pingelamellplaatidest sillatekkide ehitamine on kogunud populaarsust, siis on küsimuse alla sattunud nende vastupidavus, sest mõnel juhul on esinenud ettenägematut lagunemist. Peamiseks lagunemise põhjuseks loetakse puidu pehastumist, mis tuleneb

enamasti sellest, et sillatekid pole piisavalt niiskuse eest kaitstud. Kui sillatekile jääb vesi seisma, siis see võib tõsta puidu niiskussisaldust üle 20% ning plusskraadide juures võivad sellise niiskusesisalduse juures tekkida seenkahjustused. (Massaro, Malo 2014: 11) See tähendab seda, et sillateki ehitus ja selle katend peab olema hoolikalt läbi mõeldud. Vesi ei tohi tekile seisma jääda, mis juhtub tavaliselt olukorras, kus sillatekiplaat vajub nõgusaks omakaalu- ja/või kasuskoormuse tõttu. Lähimõeldult peavad olema lahendatud ka kõik sõlmed, et vältida vee liikumist konstruktsiooni vahele ja sellega omakorda puitdetailide niiskusesisalduse tõusu.

Oluliseks probleemiks on eelpingestatud tekiplaatide puhul veel eelpinge vähenemine. Enamasti tekib antud probleem sellest, et kasutatakse suure niiskusesisaldusega puitu, mis kuivades kahaneb ning kaob lamellide vaheline hõõrdejõud. (Ekholm 2013: 50) Lisaks kaob eelpinge veel puidu niiskusesisalduse muutustest ning roomest tulenevalt. Kuna puit on alaliselt surve all, siis puidu rakusein surutakse kokku. Niiskusesisalduse muutudes puit paisub ning kahaneb ning sellest tulenevalt kaob eelpingestuse jõud ning lamellide omavaheline hõõrdumine. (Ritter 1990: 9-16) Probleemi lahenduseks on see, et plaadi eelpinget suurendatakse teatud aja tagant (Ekholm 2013: 50). Sillateki vähese eelpinge puhul tekib sillatekile koormuse rakendudes kaks probleemi: põiksuunaline läbipaine ning põiksuunaline lamellide nihkumine (joonis 1.16.) (Pousette 2016: 301).



Joonis 1.16. Vasakul pool toimub sillatekile koormuse rakendudes põiksuunaline läbipaine ning paremal pool lamellide põiksuunaline nihkumine (Pousette 2016: 301).

Mõlemad juhud halvendavad sillateki kui ühtse konstruktsiooni tööd tervikuna. Lisaks toovad Pousette jt (2017: 117) välja, et probleeme on ka eelpingestusvarrastest koormuse jaotamisega välimistele lamellidele. Kuna eelpingestusjõud on suured, siis muljub tavaliselt ära äärmine lamell, mis võtab vastu kõige suurema pinge. Tekiplaadi keskmises osas pinge väheneb.

1.2.7. Kaarekujuga pingelamellplaadist sillad

Pingelamellplaadist sillatekki on kasutatud ka kaarekujuga sillatekkides (joonis 1.17.). Eesmärgiks on panna puit tööle temale kõige tugevamas suunas ehk pikisuunas. Kermani ja Freedmani (2005) poolt läbiviidud staatilised koormamised ning vibratsiooni testid kinnitasid seda, et antud konstruktsiooni tugevus- ning jäikusomadused on oluliselt paremad kui tavaliselt saledate puitkonstruktsioonide puhul. Konstruktsioon võttis vastu olulisemalt suuremat koormust ning seejuures ei näidanud väsimusmärke. (Kermani, Freedman 2005: 155-164)



Joonis 1.17. Katsetamiseks kaarekujuga 20-meetrise sildeavaga eelpingestatud sillateki ehitamine Glentressis Šotimaal (Kermani, Freedman 2005: 158).

Wegscheideri ja kolleegide poolt (2010) läbiviidud uuringute käigus uuriti kaarekujuga pingelamellplaadist silla tsüklilist käitumist. Selleks ehitati 8 m sildeavaga 1 m laiune ja 2 m eeltõusuga kaarekujuga pingelamellplaadist silla tugikaar, mis koosnes 200 mm laiustest, 46,2 mm paksustest ja keskmiselt 929 mm pikkustest lamellidest ning mida koormati erinevate sagedustega 0,5 Hz ja 1 Hz tsükliliselt. Koormused valiti vastavalt raskeveokitest tekkivale koormusele. Uuriti jäävdeformatsioone ning konstruktsiooni siirdeid. Erinevate koormustega tehti kokku 96000 koormustsüklit, millest 50000 tsüklit 60 kN ja 46000 tsüklit 80 kN jõuga. Testide tulemused näitasid seda, et suuri jäävdeformatsioone konstruktsioonis ei tekkinud. Kõige suuremad jäävdeformatsioonid tekkisid 1 Hz sagedusega läbiviidud koormamise käigus, kus puidul ei olnud enam aega taastumiseks. Sellegipoolest jäi maksimaalseks jäävdeformatsiooniks ainult 8,3 mm. (Wegscheideri jt 2010)

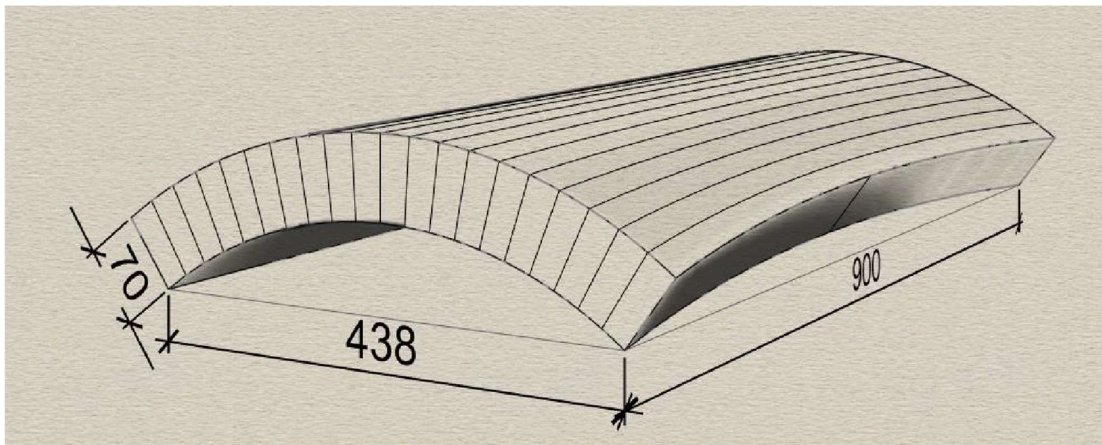
2. MATERJAL JA METOODIKA

Käesolev magistritöö on Kullamaa 2018. aastal Eesti Maaülikoolis maaehituse erialal kaitstud magistritöö edasiarendus. Ülikoolipoolse diplomipraktika käigus oli autor Kullamaal abiks 2018. aasta kevadel katsekehade koostamisel ning katsete läbiviimisel. Autor ei osalenud Kullamaa magistritöö katsekehade tehnoloogilises väljatöötamises. See tähendab seda, et antud töös kasutatavate katsekehade materjalid, kruvid, eeltõusud ning muud parameetrid on paika pandud Kullamaa (2018) poolt. Autori eesmärk on edasi uurida antud konstruktsioonitüübi käitumisomadusi katsekehade palju-tsüklilisel koormamisel.

2.1. Valim ja katsekehad

Autori poolt kasutatavad katsekehad on valmistatud Kullamaa magistritöö tarbeks 2018. aasta kevadel, millede ehitamises autor ka ise osales. Kasutusele on võetud seeriaste 01...05 katsekehad. Kuigi osaliselt suruti katsekehad puruks, siis on need antud magistritöö raames autori poolt taastatud – katkised katsekehad on võetud lahti, eemaldatud purunenud lamellid, freesitud uued ning seejärel on katsekehad uuesti kokku pandud. Kuna igast katseseeriast on olemas kolm katsekeha, siis ei pidanud autor vajalikuks katsekehasid juurde ehitada, sest keskmise tulemuse saamiseks on see piisav. Katsekehade juurde ehitamisest tulemuste usaldusväärsuse tõstmiseks loobus autor puidu niiskusesisaldusest tulenevate probleemide tõttu ja aja puudusel. Nimelt, kui koostada igasse katseseeriasse juurde üks katsekeha, siis on nende kokkupanekuks vajalik lamelle leotada, et vältida puidu rakustruktuuri purunemist lamellide painutamisel. Uued katsekehad ei oleks aga ajaliselt jõudnud olemasolevate katsekehadega samasuguse niiskusesisalduseni kuivada.

Kuna kaksikkõveruse saavutamiseks pidi lamelle töötleva selliselt, et keskelt oleks lamellide ristlõige väiksem kui otsest, siis modelleeris Kullamaa (2018: 26) programmiga „*Rhinoceros*® 5“ katsekehade 3D-mudelid (joonis 2.1.). See andis Kullamaale (2018: 26) hea ettekujutuse katsekehade ning nende mõõtmetest.



Joonis 2.1. Viienda seeria katekeha 3D-mudel (Kullamaa 2018: 27).

Mudelite lõplikud mõõtmed on valitud Kullamaa (2018: 26) poolt, arvestades kättesaadavaid materjale, nende maksumust, lamellide töötlemise- ning alusrakise mõõtmeid. Lamellide töötlemise jaoks vajalikud rakise mõõtmed on valitud ja tööjoonised tehtud juhendaja T. Teppand'i poolt vastavalt Eesti Maaülikooli metsatööstuse labori freesipingi aluslaua suurusele ning rakise sinna kinnitamise võimalikkusele.

2.2. Materjal ja töötlus

2.2.1. Materjal ja visuaalne sorteerimine

Autor oli diplomipraktika käigus 2018. aasta kevadel abiks Kullamaal materjali järkamisel ning visuaalsel sorteerimisel. Samuti teostas käesoleva töö autor 2019. aasta jaanuaris katekehade remondiks vajaminevate lamellide valmistamiseks samade põhimõtetega materjali järkamise ning sorteerimise (joonis 2.2.), mida on täpsemalt kirjeldatud järgmises lõigus. Katekehade parandamiseks vajaminevate lamellide valmistamise jaoks kasutati ristlõike mõõtmetelt ning kvaliteedilt samasugust materjali nagu 2018. aasta kevadel valmistatud katekehades. Asenduslamellide tootmiseks kasutati materjali pikkusega 3300 mm. Antud pikkusest sai välja lõigata 3 lamelli pikkusega 900 mm ning 600 mm pikkune ülejääk andis paremad valikuvariandid materjali sorteerimiseks, sest oli rohkem võimalusi materjalist puidurikkeid välja lõigata.



Joonis 2.2. Järgatud ning sorteeritud lamellide toorikud, vasakul ilma suuremate kahjustusteta ning paremal väiksemate riketega (Autori foto 2019).

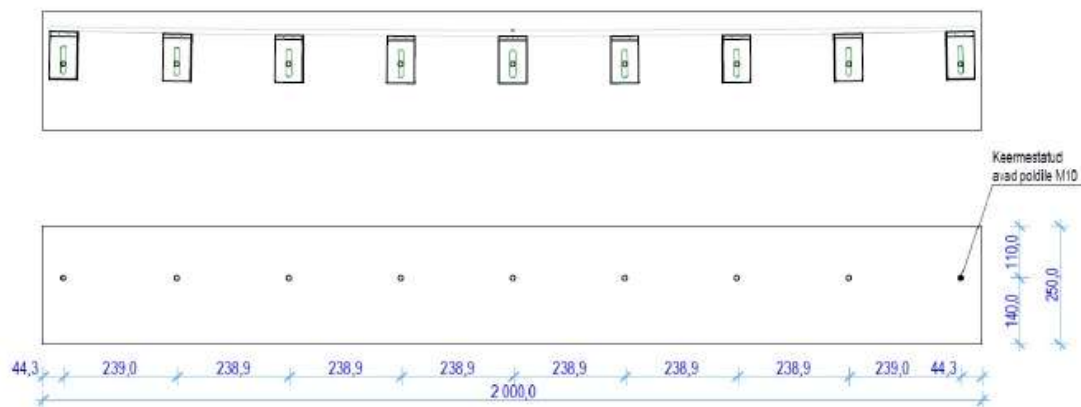
Sillateki mudelite katsekehade valmistamiseks Kullamaa (2018) töö tarbeks kasutati ümarkantsest kuusepuidust (nn kalibreeritud) nelikantset hõõvelmaterjali, mille kvaliteediklass on AB ning ristlõike mõõtmed on 28×70 mm. Lamellid lõigati pikkusesse 900 mm. Materjali järkamise käigus teostati ka selle visuaalne sorteerimine. Suuremad oksad, praod ning muud kahjustused lõigati materjalist välja. Pragude puhul oli väljasorteerimise kriteeriumiks pikkus ning okste puhul diameeter. Üle 5 cm pikkused nii piki- kui ka ristisuunalised praod ja oksad, mis olid suuremad kui pool ristlõike kõrgusest, lõigati välja. Väiksemad kahjustused ning oksad jäeti lamellide otstesse, kuna Kullamaa (2018) eeldas, et katsekeha puruneb pigem koormuse rakendamise punkti lähedalt, mitte toepiirkonnast. (Kullamaa 2018: 29) Sama metoodikat kasutati autori poolt sillateki mudelite taastamisel.

2.2.2. Lamellide töötlus

Esimene etapp lamellide töötamise juures oli toormaterjali 900 mm pikkusteks toorikuteks lõikamine. Materjali järkamine toimus saega DeWalt DW717XPS. Kuna kokku valmistati kuus erinevat katsekehade seeriat, millest igaüks koosnes kolmest katsekehast, siis kokku lõigati valmis 360 lamellitoorikut, et ühtekokku koostada 18 katsekeha, millest igaüks koosnes 20 lamelist. (Kullamaa 2018: 29)

Teine etapp lamellide töötuse juures oli lamellide kiilukujuliseks freesimine. Käesoleva töö autor Kullamaa (2018) magistritöö katsekehade lamellide freesimise ja rakiste ehitamise juures ei viibinud.

Rakiste joonised on koostanud Tõnis Teppand (joonis 2.3) ning metallosad telliti AT Metalli Grupp OÜ-st. Rakistele lõigati 18 mm paksusest veekindlamast vineertahvlist alusplaadid, mille külge kinnitati nurgikutega rakiste tugiseinad, mis lõigati välja 12 mm paksusest vineertahvlist. (Kullamaa 2018: 30)



Joonis 2.3. 90° tugiseinaga rakise joonis (T. Teppand'i joonis 2018).

Kasutati kahte erinevat rakist: 90° tugiseinaga (joonis 2.4.) ning kallutatava tugiseinaga (joonis 2.5.). Kallutava tugiseinaga rakise nurgikute alla paigutati erinevate katseseeriade korral erinev arv 0,6 mm paksuseid plekiribasid, millega muudeti rakise tugiseina kallet. Rakise tugiseina kaldenurga muutmine oli vajalik, et anda ühelt poolt juba freesitud lamellile uuesti 90° nurk freesitera poole. (Kullamaa 2018: 31)



Joonis 2.4. Pealtvaade 90° tugiseinaga rakisest (Kullamaa 2018: 30).



Joonis 2.5. Pealtvaade kallutatava tugiseinaga rakisest (Kullamaa 2018: 31).

Katsekehasid töödeldi kallutatava spindliga puidufreespingiga Griggio T45 TPL. Esmalt kasutati 90° tugiseinaga rakist ning muudeti freespingi tera kaldenurka, mida muudeti iga katseseeria järel järjest suuremaks, et tekitada suurema kiilukujulise ristlõikega lamell. Tabelist 2.1. on näha, kui suurt freesitera kallet on erinevate seeriade korral kasutatud. Seejärel võeti kasutusele kallutatava tugiseinaga rakis, mille nurgikute alla paigutati plekiribad (tabel 2.1.). Plekiribade paksuste varieeruvuse tõttu ei suudetud alati tagada sama kallet rakise tugiseinal (tabel 2.1.). Kallutatud rakisega lamellide teise külje freesimise ajal hoiti samuti freespingi tera nurga all. Kõige väiksema eeltõusuga katsekehad olid seerias 01 ning kõige suurema eeltõusuga seerias 05. Vastavalt sellele olid ka lamellid kõige vähem kiilukujulised seerias 01 ning kõige rohkem seerias 05. (Kullamaa 2018: 31-32)

Tabel 2.1. Erinevate katseseeriade freesitera kalded ning kallutatava tugiseinaga rakise kasutatud plekiribade paksused (Kullamaa 2018: 31)

Katseseeria		01	02	03	04	05
Plekiribade arv (tk)		2	3	4	5	6
Freesitera kalle (⁰)		0,40	0,70	1,11	1,47	1,84
Plekiribade paksus (mm)	1 vinkel	1,29	1,83	2,56	3,15	3,73
	2 vinkel	1,26	1,82	2,54	3,16	3,73
	3 vinkel	1,33	2,00	2,57	3,19	3,80
	4 vinkel	1,20	1,81	2,46	2,98	3,72
	5 vinkel	1,25	1,85	2,58	3,05	3,62
	6 vinkel	1,24	1,88	2,59	3,18	3,78
	7 vinkel	1,27	1,87	2,51	3,28	3,86
	8 vinkel	1,30	1,95	2,56	3,18	3,76
	9 vinkel	1,21	1,85	2,57	2,99	3,62

Kullamaa magistratöö (2018) katsete käigus purunenud katsekehade taastamiseks valmistas antud töö autor 2019. aasta veebruarikuus uued lamellid. Esmalt järkas autor lamellid pikkusmõõtu ning seejärel valmistas autor ette rakised, mis 2018. aastal Kullamaa töös kasutatuga võrreldes mõningal määral erinesid nii alusplaadi kui ka edasiarendatud kallutatavate tuge poolest. Mõlemale lamellide freesimise rakisele lisati vineerist

alusplaatide alla terasest alusplaadid. Terasest alusplaat andis paremad võimalused rakise tugiseina kinnitamiseks vajalike nurgikute paigaldamiseks ning lisaraskusest tulenevalt püsis rakis ka freesimise ajal stabiilsemalt paigal (joonis 2.6.). Kallutatava tugiseinaga rakisele lisas autor keermestatud vardaga tugiseina kaldenurga muutmise mehhanismid (joonis 2.6.).



Joonis 2.6. Vasakul terasest alusplaadiga 90° seinaga lamellide freesimise rakis. Rakis kinnitatud freespingi alusplaadile peitpeaga poldiga tsentrist ja pitskruvide abil ottest (Autori foto 2019). Paremal kallutatava tugiseinaga rakis koos keermestatud vardaga tugiseina kaldenurga muutmise mehhanismiga (Autori foto 2019).

Võrreldes Kullamaa (2018: 31) magistritöö raames freesimiseks kasutatud nurgikute ja plekiribade abil kaldenurga muutmist, suurendas antud mehhanismi lisamine oluliselt kaldenurga muutmise täpsust ning kiirendas ka oluliselt seeriade vahel rakise tugiseina kaldenurga muutmise kiirust. Rakise tugiseina kaldenurka mõõdeti digitaalse nurgamõõtmisega CMT DAG-001. Oluline on siinkohal veel välja tuua, et sajandiku kraadi täpsusega, nagu on tabelis 2.1. esitatud freesitera kalded, ei ole võimalik lamellide freesimiseks freesitera kaldenurka tegelikkuses muuta freespingi häälestuse tõttu (kümnendiku kraadi täpsusega) ning nii Kullamaa kui autori poolt freesitud lamellide puhul on antud tabeli väärtuseid ümardatud, mis omakorda vähendas lamellide freesimise täpsust. Lamellide freesimisel kasutati eelnevalt tabelis 2.1. toodud kaldeid, et tagada uute freesitud lamellide identsus vanade lamellidega.

2.3. Kruvikava

Katsekehade lamellide omavaheliseks ühendamiseks kasutati puidukruve. Kruvide eesmärgiks on takistada lamellide omavahelist nihet ning katsekehade koostamisel võtta vastu lamellide kokku surumisest tekkivaid paindepingeid. Kruvide asukohtade valiku jaoks koostas Kullamaa kruvikava. Kruvikava eesmärgiks oli paigutada kruvid selliselt, et kolme lamelli lõikes ei jääks kruvide omavaheline vahekaugus nõutust väiksemaks. (Kullamaa 2018: 33-36) Lamellidele märgiti peale kruvide asukohad ja pikkused, mis tagas selle, et õige pikkusega kruvi saaks õigesse kohta. Vastasel juhul oleks tekkinud oht, et vale pikkusega kruvi võib vales kohas läbi lamellide minna teise kruvi vastu.

Kruvide valikul lähtus Kullamaa Rothoblaasi kataloogist „*Screws for Wood*“. Sealt valiti kruvid pikkusega 70 mm ning läbimõõduga 4 mm. Ühte lamelli oli ette nähtud 11 kruvi. Kruvide paiknemine oli ette nähtud nõnda, et 6 kruvi asuks ülemises reas ning 5 kruvi alumises. Kruvikava koostamisel lähtus Kullamaa põhimõttest, et esimesena ühendatakse katsekeha kaks keskmist lamelli ning seejärel hakatakse äärtesse lamelle juurde lisama. Keskmised lamellid ühendati omavahel lühemate kruvidega ning järgmiste lamellide lisades läbisid kruvid parema sidususe eesmärgil juba kolme lamelli. (Kullamaa 2018: 35)

Nõuded, millest Kullamaa (2018: 36) on lähtunud kruvikava koostamisel (EVS-EN 1995-1-1: 2007):

- kinnituselementide suurus ja paigutus liidetes, nende vahekaugused ning kaugused otstest ning servadest peavad olema valitud nii, et jäikus ja tugevus oleksid tagatud;
- kui liites on mitu kinnituselementi, mis on sama suuruse ning tüübiga, siis nende kogukandevõime võib olla väiksem üksikute kinnituselementide summeeritud kandevõimest;
- kui kruvi silindrilise osa läbimõõt on väiksem kui 6 mm, siis ei ole okaspuidus kasutatavatele kruvidele auke vaja ette puurida;
- kruvi teravikupoolses elemendi otsas oleva hammastatud osa süvistuse sügavus ei ole väiksem kui 4d.

Kinnituselementide paigutus on Kullamaa (2018: 36) poolt valitud Rothoblaasi 2014. aasta kataloogi „*Screws for Wood*“ järgi. Kruvide vahekaugus ühes reas ning ridade vahel on

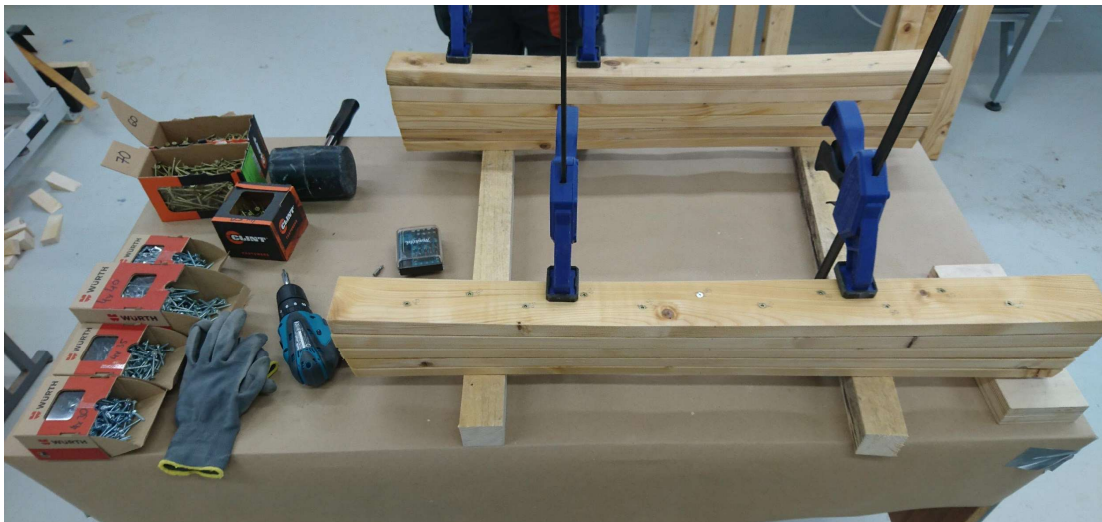
minimaalselt 20 mm, koormatud ja koormamata otsast 40 mm ning koormatud servast 28 mm ja koormamata servast 20 mm. Paigutusel on lähtutud sellest, et jõud mõjuvad kiudude suhtes nurga all ning auke pole kruvidele ette puuritud. (Kullamaa 2018: 36)

2.4. Katsekehade kokkupanek

Diplomipraktika käigus viibis töö autor 2018. aasta kevadel Kullamaa magistritöö katsekehade kokkupaneku juures ning oli osaliselt ka kokkupanekul abiks.

Enne katsekehade montaaži leotati lamelle veevannis, et saavutada küllastusniiskus, mis jääb enamikel puiduliikidel 30% juurde. Selle etapiga taheti vältida lamellide painutamisel purunemist katsekehade koostamise käigus. Pärast lamellide leotamist küllastusniiskuse niivõeti lamellid vahetult enne katsekehade kokkupanekut veevannist välja. Pärast väljavõtmist märgiti kruvikava šabloonidega lamellidele kruvide pikkusmõõdud ning nende asukohad. (Kullamaa 2018: 36)

Katsekehade koostamist alustati keskmistest lamellidest L10 ja L11 (joonis 3.1) (Kullamaa 2018: 36). Keskmiste lamellide kokkukruvimisel saadi lamellide omavahel kokkusurumiseks kasutada veel pitskruve (joonis 2.7.), kuna soovitatav kõverus polnud suur.



Joonis 2.7. Sillatekimudelite keskmiste lamellide kokkukruvimine (Autori foto 2018).

Mida suurema eeltõusuga olid katseseeria katsekehad, seda suuremat jõudu tuli lamellide omavaheliseks kokkusurumiseks kasutada, seda eriti äärmiste, kõige rohkem painutatud lamellide puhul. Selleks võeti appi liimpuidu valmistamiseks mõeldud press ning koormarihmad (joonist 2.8.).



Joonis 2.8. Katsekeha kokkukruvimine pressi ja koormarihmade abil (Autori foto 2018).

Viimaste lamellide kokkusurumiseks oli suure eeltõusuga katseseeriade mudelitel kumerus nii suur, et pressi all lamelle enam kokku suruda ei olnud võimalik ning edasi pidi jätkama ainult koormarihmade abil (Kullamaa 2018: 36). See oli käesoleva töö autori arvates katsekehade kokkupaneku kõige suuremaks probleemiks, sest ainult koormarihmadega iga lamelli omavahel kokku tõmmates oli ajakulu väga suur.

2.5. L. Kullamaa magistritöö katsekehade taastamine

2.5.1. Katsekehade lahti võtmine

Kuna antud töös võeti kasutusele Kullamaa 2018. aasta magistritöö raames valminud katsekehad ning need olid saanud kahjustada, siis tuli autoril need esmalt taastada (tabel 2.2.). Katsekehadel enim levinud kahjustus seisnes selles, et katsekeha keskosast

lamellid eraldusid üksteisest (joonis 2.9.) nii palju, et katsekeha ei suutnud enam oma esialgset kuju taastada. Olulist rolli mängisid siinkohal kindlasti katsekehade lamellide kinnitusvahendid ehk puidukruvid, mis liiga suure läbipainde puhul oma kinnituskohas muljusid kruvi ümbritsevat puitu. Sellest tulenevalt hakkasid kruvid oma pesas liikuma ning takistasid katsekeha kuju taastumist. Katsekehade lamellide eraldumised üksteisest olid paljuski tingitud Kullamaa iga katseseeria KK 1-3 katsekeha neljandast koormustsüklist (üle sillateki mudeli negatiivse läbipainde), kuid siiski umbes pooled lamellide eraldumistest toimusid Kullamaa poolt kolme koormustsükliga koormatud katsekehadel. Neljanda koormustsükli eesmärk oli katsekehad purustada, kuid kuna enne tuli vastu toerakise põhi, siis lõplikult katsekehad ei purunenudki (Kullamaa 2018: 42).

Tabel 2.2. Lahti võetud katsekehad ning välja vahetatud lamellid

KK nimetus	Lahti võetud	Lahti võetud ühelt/mõlemalt poolt tsentrit	Välja vahetatud lamellid
01 KK 1-3	Ei		
01 KK 2-3	Ei		
01 KK 3-3	Ei		
02 KK 1-3	Ei		
02 KK 2-3	Ei		
02 KK 3-3	Ei		
03 KK 1-3	Jah	Mõlemalt poolt	L01, L14
03 KK 2-3	Ei		
03 KK 3-3	Jah	Mõlemalt poolt	
04 KK 1-3	Jah	Mõlemalt poolt	
04 KK 2-3	Jah	Ühelt poolt	L17
04 KK 3-3	Ei		
05 KK 1-3	Jah	Mõlemalt poolt	L01, L10, L12, L20
05 KK 2-3	Jah	Mõlemalt poolt	L01, L10, L19, L20
05 KK 3-3	Ei		



Joonis 2.9. Katsekeha 03 KK 3-3 keskmised lamellid L10 ja L11 on üksteisest eraldunud (Autori foto 2019).

Teine põhjus, miks katsekehade lamellid autori poolt välja vahetati, oli äärmiste lamellide katki muljumine toepiirkonnast (joonis 2.10.). Probleem esines enamasti 05 katseseeria katsekehadel. Nendel kehadel oli tegemist ka kõige suurema eeltõusuga ja sellest tulenevalt võtsid nad vastu kõige suuremat koormust. Katsekehale rakendatav koormus ületas tugelele jaotudes puidu survetugevust ristikiudu – üldjuhul radiaalsuunaliselt.



Joonis 2.10. Katki muljutud toepiirkonnaga katsekeha 05 KK 2-3 (Autori foto 2019).

Kolmas põhjus, miks autor lamellid välja vahetas, oli see, kui juhuslik lamell katsekehas oli eelnevate katsete käigus purunenud. Enamasti oli see juhtunud lamellidega, milles oli suuremaid oksa. Katsekehade puhul, kus näiteks olid purunenud ainult äärmised lamellid, ei võtnud autor katsekehasid tervikuna lahti.

Katsekehade lahtivõtmise käigus uuris autor visuaalselt katsekehade lamellide muljumist ning puidukruvide käitumist. Võib välja tuua, et eriti keskmiste lamellide puhul, kus toimusid katsekehale koormust rakendades kõige suuremad siirded, oli kiilukujulise ristlõikega lamellides märgata muljumist. Seda tihti lamelli ülemises laiemas osas, mille suhtes lamellid omavahel kinni kiiluvad (joonis 2.11.). Milline lamell millisesse lamelli sisse muljus, olenes suuresti sellest, kui suur oli puidus hilispuidu osakaal ning kas lamellidesse mõjus koormus muljumisel tangentsiaal- või radiaalsuunaliselt. Teatavasti võtab puit radiaalsuunaliselt vastu suuremat koormust kui tangentsiaalsuunaliselt ning suurem hilispuidu osakaal annab puidule suurema tugevuse. Lamellide muljumine lamellide ülaosas annab kinnitust sellele, et lamellid kiilusid üksteise suhtes kinni, samuti on seda järeldanud ka Kullamaa (2018: 61). Kuna osal lamellidest oli visuaalselt näha kiilukujulise ristlõike kadumist (ülemises laiemas osas), siis võib järeldada, et osaliselt tekkisid lamellides plastsed deformatsioonid. Kullamaa (2018: 61) väidab, et plastseid deformatsioone katsekehades tervikuna ei tekkinud, ning autori hinnangul on põhjenduseks see, et liikumatute tugede poolt tekitatud sisejõud taastasid muljutud ülemise osaga lamellidest hoolimata konstruktsiooni algse kõveruse. Sellisel juhul hakkasid uuesti tööle lamellide alumises osas muljumata jäänud küljed.



Joonis 2.11. Katsekeha 05 KK 2-3 lamell L09 (ülemine) on muljunud lamelli L10 (keskmise) sisse (Autori foto 2019).

Katsekehade lahtivõtmise käigus oli veel näha, et lamellide kinnitusvahendid olid lamellide keskosas lamellidesse sisse muljutud. Tugedele lähemal ehk katsekeha äärmises osas asuvatelt lamellidelt, oli näha, et puidukruvide pead olid lamellidest väljas. Mõõdetult nihkkaliibriga varieerusid lamellide keskmises osas sissemuljutud kruvide sügavused vahemikus 0...4 mm. Samas lamellide otstest väljaulatuvate kruvide pikkused varieerusid vahemikus 0...2 mm. Lamellide keskosas sissemuljutud kruvid näitavad, et kruvid on hakanud töötama tõmbele ning on seejärel muljunud ümbruses oleva puidu. Kuna puidukruvide pead olid kõige rohkem väljas katsekeha äärmiste lamellide toepoolsetes otstes, siis see näitab, et seal olid toimunud ka kõige suuremad survejõud.

2.5.2. Katsekehade kokkupanek

Katsekehade kokkupanekuks kasutas autor põhiliselt sama tehnoloogiat, mida on kirjeldatud peatükis 2.4. Lamellid paigutati peale freesimist veevanni, kus need seisisid, kuni saavutasid küllastusniiskuse. Lamellid võeti veevannist välja vahetult enne katsekehade uuesti kokkupanekut ning mõõdeti kohe ka niiskusesisaldus, mis jäi vahemikku 30...35%. Selle etapiga taheti vältida puidu rakustruktuuri purunemist lamellide painutamisel katsekehade kokkukruvimise käigus.

Väljavahetatavatelt lamellidelt kanti kruvikava üle uutele lamellidele. Katsekehade uuesti kokkupanemisel taaskasutati kruve, mis olid eelnevalt katsekehast eemaldatud, sest autori hinnangul ei olnud kruvid deformeerinud ning sobisid uuesti kasutamiseks. Kruvid keerati vanade kruviaukude kõrvale ja sellest tulenevalt on väikesed nihkumised kruvide asetuses ehk algses kruvikavas, mis aga ei vähendanud konstruktsiooni koormustaluvust, kuna kruvid takistasid koormamise ajal eelkõige lamellide vahelist nihet. Katsekehade kokkupanekut alustati keskmistest lamellidest, kuid kui katsekeha ei võetud tervenisti lahti, siis lisati lamelle vastavalt sellele, kust need eemaldatud olid. Uute lamellidega taastati katsekehade esialgne kuju (joonis 2.12.).



Joonis 2.12. Katsekeha 05 KK 1-3, millel on välja vahetatud kokku 4 lamelli, millest 2 keskel ning 2 äärtes (Autori foto 2019).

Lamellide kokkusurumisel kasutati koormarihmu ning pitskruve. Kuna katsekeha lahtivõtmisel säilitasid vanad lamellid osaliselt oma kaare kuju, siis ei pidanud autor vajalikuks vanu lamelle uuesti veevannis küllastusniiskuse ni leotada.

2.6. Katsetametoodikad

2.6.1. L. Kullamaa katsetametoodika

Katsekehade katsetamiseks vertikaalsele koormusele töötas Liis Kullamaa oma magistritöös välja vastava katsetametoodika (Kullamaa 2018: 37).

Enne katsete läbiviimist katsekehad pildistati, kaaluti ja mõõdeti nende niiskusesisaldused. Seejärel asetati katsekehad toerakisesse, kus katsekeha tsentreeriti ja kinnitati igast nurgast kinniste liigenditugedega nii piki- kui põiksuunaliselt (joonis 2.13.). Seejärel paigaldati katsekehale koormuse jaotamiseks metallplaadid (4 tükki alla, koos šarniirse tsentriga ja tsentreeriv/koormust alumistele jaotav nende peale) ja katsekehade siirete mõõtmiseks paigaldati siirdeandurid (6 tükki) (joonis 2.13.). (Kullamaa 2018; 37-41)



Joonis 2.13. Toerakisesse kinnitatud katsekeha koos paigaldatud siirdeanduritega (Autori foto 2018).

Peale katsekeha valmisseadmist nulliti siirdeandurite näidud, seejärel kontrolliti üle, et kõik seadmed oleksid töökorras ja alustati tsüklilist koormamist hüdraulilise silindriga Lukas LZM 25/200. Siirdeandurite tööd salvestati ALMEMO 5690-2 andmesalvestajaga. (Kullamaa 2018: 41)

Katsekehasid koormati tsükliliselt kindlate jõududega, mis Kullamaa esimeste katsete vaatlemisel mõistlikuks pidas, et mitte kahjustada katsekehasid. Katsekehasid koormati seni, kuni siirded stabiliseerusid. Peale siirete stabiliseerumist võeti koormus maha ning oodati katsekehade jäävdeformatsioonide stabiliseerumist. (Kullamaa 2018: 41)

Katsekehadele tehti kolm koormustsüklit ning kõikide katseseeriade katsekehadega KK 1-3 tehti kolmele koormustsüklile lisaks ka neljas tsüklil. Algselt oli soov neljanda katseseeriaga katsekeha purustada, kuid katsekeha suruti enne vastu toerakise põhja. Pärast neljandat koormustsüklit eemaldati katsekehadelt metallplaadid ning oodati jäävdeformatsioonide stabiliseerumist. (Kullamaa 2018: 42–43)

2.6.2. L. Kullamaa katsetulemuste kokkuvõte

Kullamaa järeldas katsetulemuste põhjal, et mida suuremaks läks katsekeha eeltõus, seda suuremat koormust see vastu võttis. Tänu kiilukujulisele ristlõikele pandi lamellid katsekehas tööle nagu kiilud ning katsekehas tekkis kiilsilluse efekt. Kiilukujulistest lamellidest tingituna tekkisid katsekeha külgedele kaarsillused ning kui sirged lamellid omavahel kokku kruviti, tekitas see lamellides eelpinge. Sellega paranes katsekehade paindejäikus, mis väljendus järjest suurema eeltõusu puhul paremas koormustaluvuses. Kuigi deformatsioonid olid katsete käigus suhteliselt suured, siis katsekehad taastasid suuresti oma esialgse kuju ning sellest järeldas Kullamaa, et puidus ei tekkinud plastset deformatsiooni. Katsekehade erilise geomeetria abil pandi puit tööle temale kõige kasulikumas suunas ehk pikisuunas. (Kullamaa 2018: 60–61)

2.6.3. Autori katsemetoodika

Autori poolt läbiviidud katsete metoodika on osaliselt sarnane Kullamaa (2018: 37–43) poolt välja töötatud katsemetoodikale. Kuna kasutatud on sama toerakist ning samu katsekehasid, siis kuni allpool välja toodud neljanda punktini Kullamaa ja autori katsemetoodika põhimõtte poolest ühtib. Kullamaa (2018) ning antud töö katsed on autori poolt läbi viidud samas Maaehituse ja veemajanduse õppetooli ehituskonstruksioonide katselaboris. Võrreldes Kullamaa läbiviidud tsükliliste katsekehade koormamisega, teostati antud töö raames katsekehade palju-tsüklilisi koormamisi. Palju-tsükliliste koormuskatsete läbiviimist võimaldas uus survepress Form+Test koos katsesilindriga EPZ-D 400 mis paigaldati laborisse 2018. aasta hiliskevadel. Kuna käesoleva töö autor kasutas katsete läbiviimiseks teist pressi ning viis läbi teistsuguseid katseid, on katsemetoodika (vt allpool) alates 5. punktist koostatud autori poolt.

Kuigi läbi on viidud sarnase põhimõttega tsüklilisi koormuskatseid puitsildadele (Wegscheider jt 2010), siis antud töö raames ei olnud võimalik sarnaseid katseid läbi viia ja seda erinevatel põhjustel. Esiteks oli oluliseks põhjuseks see, et autor viis katsed läbi mudel-katsekehadega, kuid näiteks (Wegscheider jt 2010) kasutasid 8-meetrise sildeavaga katsekeha. Siit tulenevalt valisid Wegscheider jt katsete läbiviimiseks koormuste suurused ning tsüklite arvud vastavalt raskeveokitele ning nende liiklussedusele. Kuna käesoleva

töö raames viidi katsed läbi sillateki osa mudeliga, mis ei vasta mastaabilt täismõõtmistes sillale, siis ei olnud võimalik valida ka koormuseid suurte täismõõtmistes sildadega võrreldavalt. Teiseks põhjuseks oli see, et kuna autori eesmärk oli saada iga erineva katseseeria katsete tulemused, mis oleksid üksteisega võrreldavad, siis valis autor katsekehade koormamise kriteeriumiks koormuse asemel siirde.

Tingimuseks sai see, et iga katsekeha puhul mõõdetud vahemaast tema toetusnurkade ning pealispinna puutuja vahel, mille mõõtmist on kirjeldatud allolevas punktis 5, arvestati katsekeha koormamise siirdeks 20%. Eelnevalt nimetatud tingimus valiti katseeksitusmeetodil koos tsüklilise koormamise sagedusega, milleks valiti lõpuks 0,1 Hz. Valikul vaadeldi hüdropressi survesilindri käiku ning selgus, et esialgselt plaanitud sagedusega 0,5 Hz, mida kasutati ka (Wegscheider jt 2010) poolt sillateki koormamiseks, ei jõudnud survesilinder oma ettenähtud käiku täielikult ära teha. Seega leidis autor, et kõige optimaalsemaks lahenduseks on koormata katsekehasid sagedusega 0,1 Hz. Siirde tingimus valiti lähtuvalt sellest, et seeria 05 puhul ei tahetud oluliselt ületada võrdlusmomendi saamiseks Kullamaa katsete käigus olevaid siirdeid ja seetõttu arvestati iga katsekeha vahemaast tema toetusnurkade ning pealispinna puutuja vahel 20%, mis andis seeria 05 puhul Kullamaaga suhteliselt sarnased siirded. Tsüklite arvu valis autor vastavalt sagedusega 0,1 Hz üheks katseks kuluva aja järgi ning leidis, et mõistlik tsüklite arv oleks 200 tsüklit iga katsekeha kohta. See andis autori arvates optimaalse tulemuse, näidates ära selle, et kui koormata katsekeha pidevalt samasuguse siirdega, siis kui palju väheneb katsekeha koormuse vastuvõtlikkus just katse esimeses pooles ning millisel piiril hakkab see vähenema aeglasemalt.

Suuremahulisi katseid, nagu on läbi viidud Wegscheider ja kolleegide (2010) poolt, kus tsüklite arv hakkas lähenema 100 000 tsüklile, ei olnud võimalik teostada tulenevalt ajalistest piirangutest pressis kasutamisel. Standardis EVS-EN 1995-2 (2007: 29) on küll kirjeldatud, kuidas valida liiklusest tingitud väsimuskoormuse pingetsüklite arvu, siis antud juhul oleks samuti tsüklite arv läinud liiga suureks ning antud katseid ei oleks olnud autoril võimalik teostada juba eelnevalt mainitud põhjustel.

Järgnevalt on kirjeldatud autori katsete kõik tegevuste järjekorras:

- 1) Katsekehade pildistamine – enne katse alustamist pildistati katsekeha ühest otsast. Pildistati ainult neid katsekehasid, mis võeti taastamiseks lahti ning milles vahetati

välja lamelle. Autor ei pidanud vajalikuks kõiki katsekehasid üles pildistada, kuna taastamist mittevajavates katsekehades ei tekkinud Kullamaa katsete käigus visuaalselt nähtavaid muutusi.

- 2) Katsekehade kaalumine – kõik katsekehad kaaluti enne katsetamist. Kaalumine toimus elektroonilise kaaluga Kern FKB 36K0.1.
- 3) Katsekehade niiskusesisalduse mõõtmine – kõikidel katsekehadel mõõdeti niiskusesisaldust viiest erinevast punktist: mõlemast otsast lamellidest L02 ja L19 ning keskelt katsekeha L10 lamelli pealispinnast. Niiskusesisaldust mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T.
- 4) Katsekeha toerakisesse asetamine, tugede kinnitamine ning tsentreerimine pressi silindri alla (joonis 2.14.) – katsekehad asetati toerakisesse, mille igal küljel oli kaks kinnist liigendtuge. Kinnised liigendtoed takistasid liikumist X- ja Y-telje sihis, kuid jätsid vabaks pöörlemise ümber oma telje. Liigendtugesid pingutati vastu katsekeha sellise jõuga, mis fikseeris kindlalt katsekeha toerakisesse, kuid ei tõstnud katsekeha toerakisest üles ega surunud katsekeha lamelle omavahel kokku nõnda, et katsekeha eeltõus oleks hakanud suurenema. Katsekehade nurkade ülestõusmist rakisest kontrollis autor õhukese plekitükiga – kui plekitükk mahtus katsekeha nurga alla, siis tuli katsekeha tugi lahti võtta ning katsekeha uuesti kinnitada. Kullamaa katsetega võrreldes paigaldati katsekehade liigendtugele suuremad toetusplaadid mõõtudega 100×100 mm. Toetuspinna suurendamisega soovis autor vältida välimistes lamellides puidu muljumist. Pärast katsekeha kinnitamist tsentreeriti katsekeha survesilindri suhtes.



Joonis 2.14. Toerakisesse kinnitatud katsekeha 05KK1-3 (Autori foto 2019).

- 5) Katsekeha eeltõusu mõõtmine – pärast katsekeha toerakisesse kinnitamist mõõtis autor joonlauaga katsekeha eeltõusud. Selleks mõõdeti vahemaa toerakise põhjast katsekeha pealmise pinnani ja seda mõlemast katsekeha otsast. Mõõtmine teostati katsekeha keskmiste lamellide L10 ja L11 kohalt. Kui üks lamell oli teisest kõrgemal, siis arvestas autor kõrgema lamelliga. Autor märgistas katsekehade otsad tähistega „V“ ja „P“, et oleks teada, kummast katsekeha otsast on tulemust mõõdetud. Kuna katsekeha nurkade alla olid lõigatud vineerist tükid, et tõsta katsekeha toerakise põhjast kõrgemale, siis igast mõõdetud tulemusest arvestas autor maha vineeritükkide kogupaksuse 26 mm ja sai vahemaa katsekeha toerakisesse toetuvate nurkade ning katsekeha pealispinna vahel. Seejärel arvestati saadud tulemusest maha materjali ristlõike laius 70 mm ning saadi katsekeha eeltõus. Lisaks mõõtis autor ka enne katse alustamist vahemaa katsekeha pealmisest pinnast pressi survesilindrini. Enne mõõtmist tõsteti survesilinder iga kord ülemisse asendisse, et vältida survesilindri allavajumisest tulenevat viga. Vahemaa mõõtmine enne ja pärast katset katsekehast survesilindrini oli vajalik, et kontrollida katsekeha jäävdeformatsioone.
- 6) Katseks vajalike andmete pressi juhtprogrammi sisestamine ja pressi seadistamine – esimese sammuna lasti survepressi silinder vastu katsekeha ning antud survesilindri asukoht määrati siirete mõõtmise nulliks. Seejärel sisestati pressi survesilindri käigu pikkus, mis arvutati punktis 5 mõõdetud vahemaast katsekeha toerakisesse toetuvate nurkade ning katsekeha pealispinna vahel. Võrreldavate tulemuste saamiseks arvutati pressi survesilindri käigu pikkuseks antud väärtusest 20%. Katsekehade tsükliliseks koormamiseks seadistati press liikuma kiirusega 0,1 Hz. Silindri käigu graafikuks valiti positiivne sinusoid, kuna ei olnud vajalik, et press käiks oma nulljoonest üles poole, sest see oleks tekitanud hulgaliselt ebavajalikke lisaandmeid. Pressi andmete salvestamise sageduseks valiti 6 Hz. Tsüklite koguarvuks valiti 200 tsükli. Katsekeha 05 KK 3-3 puhul tehti esmalt 50 tsükli ning pärast 15-minutilist pausi ülejäänud 150 tsükli. Tegemist oli esimese katsekehaga, mida katsetati ning seetõttu oli autori arvates oluline esmalt katse-eksitusmeetodil jälgida katsekeha käitumist tsüklilisel koormamisel.
- 7) Katsekehade tsükliline koormamine kahe eraldiseisva survesilindri hüdraulilise pressiga Form+Test (täpne nimetus välja toodud lk 52) võimsusega 2×400 kN (joonis 2.15.) – kõiki katsekehasid koormati selle ühe survesilindriga. Kuna kõik katseks vajaminevad andmed olid eelnevalt juhtprogrammi sisestatud, siis esimese sammuna tuli käivitada pressi andmete salvestamine ning seejärel survesilinder.



Joonis 2.15. Katsetamiseks üles seatud katsekeha koos survesilindriga (Autori foto 2019).

- 8) Pressi peatamine – pärast 200 tsüklit peatati esmalt press andmete salvestamine ning seejärel tõsteti silinder üles oma algasendisse. Seejärel lülitati press välja.
- 9) Eeltõusu mõõtmine – kohe pärast koormamist mõõdeti katsekeha eeltõus ning vahemaa survesilindri ning katsekeha ülemise pinna vahel, nagu on kirjeldatud punktis 5.
- 10) Eeltõusu mõõtmine pärast 15-minutilist katsekeha taastumist – koormamisest 15 minuti möödudes mõõdeti uuesti katsekehade eeltõus ning survesilindri ning katsekeha vaheline vahemaa, nagu on kirjeldatud punktis 5. Survesilindri ning katsekeha vahelise vahemaa täpseks mõõtmiseks käivatati esmalt press ning liigutati survesilinder oma ülemisse asendisse, sest selle omakaalust tulenevast koormusest vajus silinder allapoole. Antud punkti eesmärk oli anda katsekehale aega „maha rahuneda“ ning vaadelda, kas ja kui palju teatud aja tagant katsekeha eeltõus taastub.
- 11) Katsekeha eemaldamine toerakisest.

3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

Antud töö raames võrdles autor katsekehade eeltõuse enne ning pärast palju-tsükliliste koormuskatsete läbiviimist. Sellega jälgiti katsekehades jäävdeformatsioonide teket. Lisaks jälgiti, kuidas muutus katsekehade vastupanu koormusele ehk vastuvõetava koormuse väärtuse muutust sõltuvalt tsüklite arvust. Saadud tulemusi võrreldi osaliselt Kullamaa 2018. aasta kevadel läbiviidud katsete tulemustega (Kullamaa jt 2018). Kullamaa poolt läbiviidud ning antud töö raames teostatud katsete tulemusi võrreldes oli oluline jälgida katsekehade erinevat niiskusesisaldust. Tulemuste analüüsimisel arvestati ka katsekehade taastamist – kas ja millises mahus oli katsekeha lahti võetud ning uuesti kokku monteeritud. Samuti võeti arvesse Kullamaa poolt läbi viidud koormustsüklite arvu. Autori katsete andmed leiab töö lisadest 1–5.

3.1. Katsete tulemused

Katsete tulemused on esitatud koondtabelina (tabel 3.1.) mis on koostatud katsete raporti põhjal (Karu jt 2019). Autor lisas tabelisse andmed vastavalt sellele, mida katsete käigus jälgiti. Et iga katse käigus teostati 200 koormustsüklit, siis seetõttu esitas autor katsekehale rakendatud koormuse ainult esimesel ja viimasel tsüklil. Seejuures on välja toodud, mitu protsenti moodustas viimasel tsüklil katsekehale rakendatud koormus esimesest. Välja on toodud ka katsekehale rakendatud minimaalne koormus. Jäävdeformatsioonid on tabelis 3.1. esitatud otstest mõõdetuna, kus on esitatud katsekeha kahest otsast mõõdetud tulemuste keskmine ning keskelt, kus mõõdeti jäävdeformatsioone ühest kohast. Katsekeha siirdeid koormamisel ei ole tabelis 3.1 esitatud, kuna need olid katse käigus pidevalt konstantsed ning siirded on välja toodud lisades 1-5. Lisaks on mõningad andmed katsete kohta, nagu näiteks katsekehade eeltõusud ja niiskusesisaldused, välja toodud lisades 1–5 asuvates katseandmete tabelites.

Seeriatesiseselt olid katsete tulemused suuresti erinevad ning seetõttu ei olnud autori hinnangul otstarbekas statistilist keskmist arvutada (tabel 3.1.). Esimestel tsüklitel võtsid

katsekehad vastu seeriasiseselt väga erinevas suurusjärgus koormuseid. Näiteks oli seeria 05 katsekehale 1-3 rakendatav koormus esimesel tsüklil 25,23 kN, seevastu katsekehal 3-3 ainult 12,12 kN. Antud näite puhul oli erinevus 2,08-kordne, mis oli ka kõige suurem seeriatesisene erinevus tulemustes. Enamasti jäi seeriasiseselt kahe katsekeha vastupanuvõime koormusele samasse suurusjärku ning ühe katsekeha tulemus oli oluliselt erinev.

Kui katsekehadele rakendatavad koormused erinesid esimestel tsüklitel üksteisest oluliselt, siis oli tulemus suhteliselt sarnane ka 200. tsüklil (tabel 3.1.). Siiski on märgata seda, et katsekehadel, mis esimestel tsüklitel olid tulemuste poolest sarnases suurusjärgus, oli 200. tsüklil rakendatavate koormuste vahe väiksem kui esimestel tsüklitel. Kui näiteks vaadelda seeria 04 katsekehasid 2-3 ja 3-3, siis oli tulemustest näha seda, et kui katsekehade vastupanuvõime koormusele oli esimestel tsüklitel erinev 1,32 kN, siis 200. tsüklil ainult 0,12 kN. Samasugune käitumine iseloomustab ka teisi seeriaid.

Katsekehade vastupanuvõime vähenemine koormusele ei olnud sujuv (tabel 3.1.). Kõige väiksemat vastupanu koormusele ei tekitanud katsekehad viimastel tsüklitel. Katsekehal 01 KK 3-3 oli viimasel tsüklil katsekehale rakendatav koormus 2,66 kN, seevastu kõige väiksem rakendatav koormus oli 2,58 kN ning see oli 107. tsüklil. See tähendab, et katsekeha vastupanuvõime koormusele oli kõige väiksem palju-tsüklilise koormamise keskel ning seejärel hakkas katsekehale konstantse siirde puhul rakendatav koormus uuesti suurenema.

Keskmised jäävdeformatsioonid otstest ja keskelt mõõdetuna olid seeria 01 puhul suhteliselt sarnased, kuid seevastu katsekeha vastupanuvõimes koormusele olid toimunud vähenemised erinevalt (tabel 3.1.). Katsekehad 2-3 ja 3-3 võtsid peale 200. koormustsüklit vastu vastavalt 85,54% ja 86,75% esimesel tsüklil rakendatud koormusest, kuid katsekeha 1-3 puhul ainult 78,42%. Teiste seeriade juures on näha seda, et vastupanuvõime koormusele peale 200. koormustsüklit oli vähenenud protsentuaalselt kõige vähem nendel katsekehadel, millel olid tekkinud ka kõige väiksemad jäävdeformatsioonid. Otstest ja keskelt mõõdetud eeltõusudest on näha seda, et enamasti tekkisid koormamise käigus katsekehade keskosas suuremad jäävdeformatsioonid. Suurim erinevus ilmnis katsekehal 03 KK 3-3, mis oli otstest 4,5 mm ning keskelt 8,0 mm.

Tabel 3.1. Katsetulemuste koondtabel (Karu jt 2019)

Katsekeha	Koormus 1. tsüklil (kN)	Koormus 200. tsüklil (kN)	Minimaalne koormus (kN)	Keskmise jääddeformatsioon (mm)		200. tsükli koormus 1. tsükli koormusest (%)
				Ottest	Keskel	
01 KK 1-3	2,43	1,91	1,84	7,5	9,0	78,42
01 KK 2-3	3,35	2,87	2,85	7,0	8,0	85,54
01 KK 3-3	3,07	2,66	2,58	7,5	9,0	86,75
02 KK 1-3	3,43	2,97	2,96	6,0	6,0	86,72
02 KK 2-3	4,89	3,91	3,84	7,5	8,0	79,96
02 KK 3-3	3,62	2,98	2,97	8,0	7,0	82,39
03 KK 1-3	10,61	9,52	9,50	6,5	7,0	89,77
03 KK 2-3	5,91	5,06	5,01	8,0	9,0	85,61
03 KK 3-3	11,00	9,88	9,86	4,5	8,0	89,82
04 KK 1-3	16,09	13,80	13,74	7,0	9,0	85,74
04 KK 2-3	11,23	9,38	9,38	8,5	8,0	83,53
04 KK 3-3	9,91	9,26	9,20	4,5	6,0	93,36
05 KK 1-3	25,23	20,45	20,42	6,8	9,0	81,06
05 KK 2-3	23,56	20,30	20,29	6,5	9,0	86,17
05 KK 3-3	12,12	11,22	11,16	2,5	5,0	92,55

Lisades välja toodud katsete andmete tabelitest on näha seda, et enne katset mõõdetud eeltõusud on katsekehadel suhteliselt sarnased. Kõige suurem erinevus on katsekehal 03 KK 1-3, mille vasaku ja parema otsa eeltõusude erinevus oli 3,0 mm. Teistel katsekehadel jäid eeltõusude erinevused vahemikku 0...2 mm. Pärast koormamist 15 minuti möödudes korratud katsekehade eeltõusude mõõdistamine suuri muutusi ei toonud. Ainukesena muutusid seeria 02 katsekehade eeltõusud, mis suurenesid maksimaalselt 1,0 mm ja seeria 05 katsekehal 3-3, mille eeltõus peale 15 minutit „rahunemist“ tõusis mõlemast otsast 2,0 mm. (lisa 3)

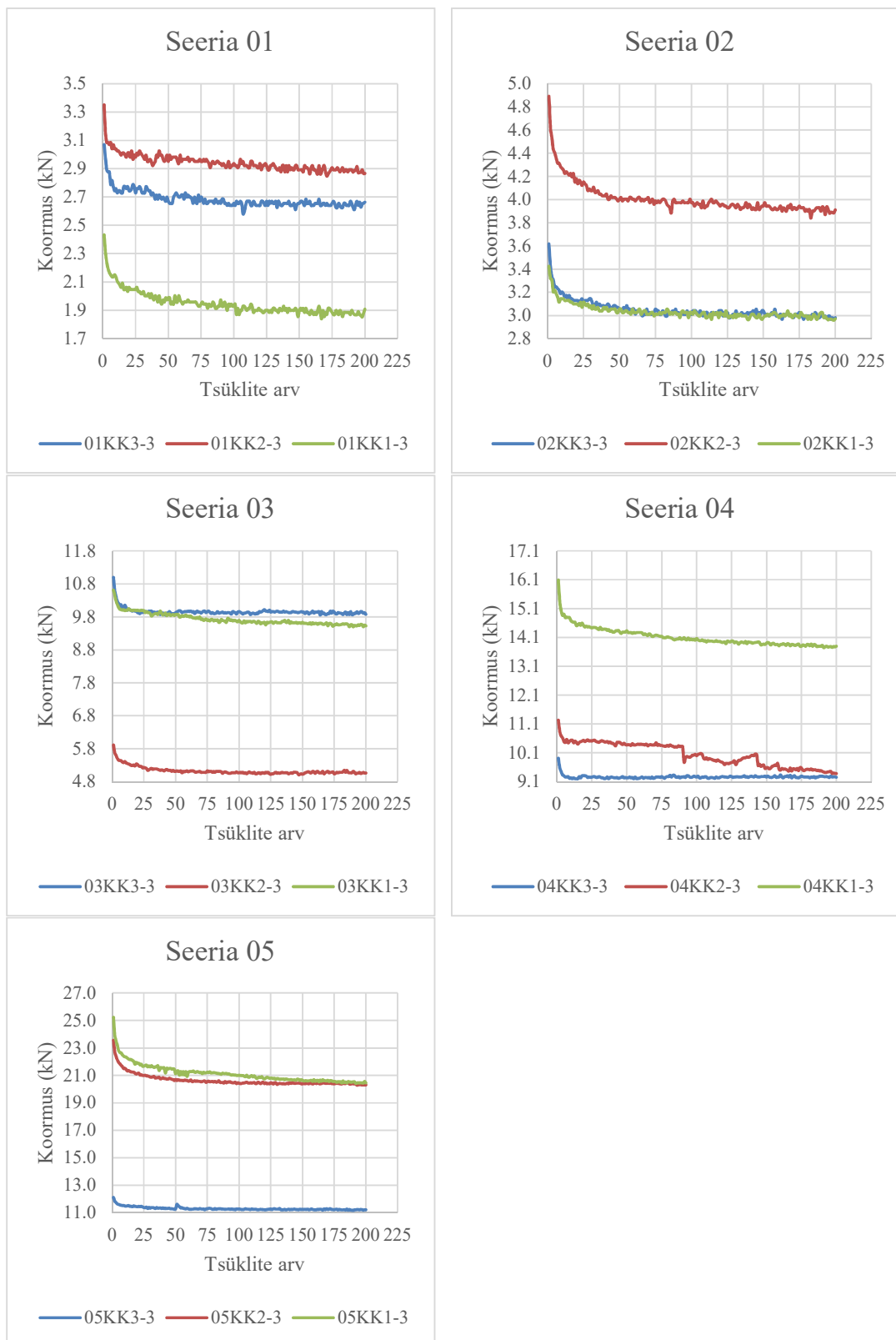
Ükski katsekehadest ei saanud palju-tsüklilise koormamise käigus visuaalselt hinnatavaid kahjustusi. See tähendab seda, et toepiirkondades ega lamellide vahel ei toimunud puidu visuaalselt nähtavat muljumist ning lamellid üksteisest ei eraldunud. Kõigi katsekehade niiskusesisaldus jäi vahemikku 4,5...7,3% (lisad 1–5).

3.2. Analüüs

Tulemuste analüüsimiseks koostas autor katsete raporti põhjal (Karu jt 2019) graafikud, mis annavad autori hinnangul kõige parema ettekujutuse katsete käigus katsekehade toimunust. Graafikutel on kirjeldatud seeriade kaupa erinevate katsekehade vastupanuvõimet koormusele sõltuvalt tsüklite arvust (joonis 3.1.). Lisaks kasutas autor tulemuste võrdlemiseks Kullamaa katsete raportit (Kullamaa jt 2018) ning töö lisades asuvaid katseandmete tabeleid.

Kõikidel katsekehadel on kõige suuremat koormusele vastupanuvõime vähenemist näha koormamise esimestel tsüklitel. Kuni 25. tsüklini toimus üldiselt suurem koormusele vastupanuvõime vähenemine, mille käigus toimus väikene stabiliseerumine ning hiljem jätkus koormuse vastupanu vähenemine juba vähemal määral. Katsekehade vastupanuvõime koormusele suurt langust esimestel tsüklitel võib seletada sellega, et katsekeha sättis ennast toerakisesse sisse ja lamellide vahelised pilud sulgusid. Kuigi hilisem vastupanuvõime koormusele vähenes väiksemal määral, siis toimus see kõikuvalt. Graafikutes nähtav kõikuvus (joonis 3.1) võib olla tingitud mõningal määral sellest, et katsetulemuste salvestamine toimus sagedusega 6 Hz ja osaliselt ei pruukinud pressi maksimaalne siire ning andmete salvestamine ühtida täpselt õigel hetkel. Ilmselt toimus katsekehades ka lamellide omavaheline sissesobitumine. Kõige olulisem aspekt on tõenäoliselt see, et katsekehades hakkasid osaliselt tekkima jäävdeformatsioonid ning katsekeha hakkas endas koormust ümber jaotama.

Kui võrrelda seeria 02 katsekehade käitumist seeria 01 katsekehade, siis võib välja tuua selle, et kui seeria 01 puhul tekitas kõige väiksemat vastupanuvõimet koormusele katsekeha, millega oli Kullamaa poolt läbiviidud neljas koormustsükkel, siis seeria 02 puhul oli kõige väiksem vastupanuvõime koormamisele esimeste tsüklite puhul samuti katsekehal, millega viidi läbi täiendav neljas koormustsükkel. Siiski, üldiselt jäi vastupanuvõime koormusele suuruse poolest samasse suurusjärku katsekehaga 02 KK 3-3, millega ei viidud Kullamaa poolt läbi täiendavat koormustsükli.



Joonis 3.1. Katseseeriade 01...05 katsekehade koormusele vastupanuvõime vähenemine sõltuvalt tsüklite arvust (Karu jt 2019).

Autori poolt läbi viidud katsete tulemused ühtisid Kullamaa katsete tulemustega ainult seeria 01 ja 05 puhul. Teiste seeriade tulemusi autor Kullamaa tulemustega kõrvutada ei saanud, sest katsekehade siiretes ei tekkinud Kullamaa ja autori poolt läbiviidud katsetes kattuvusi.

Esimese katseseeria kolme katsekeha keskmine niiskusesisaldus oli autori poolt läbi viidud katsete hetkel 7,8% (lisa 1). Kullamaa läbi viidud katsete ajal oli seeria 01 katsekehade keskmine niiskusesisaldus 17,9% (Kullamaa jt 2018). Kuna puidu tugevus suureneb koos niiskusesisalduse vähenemisega, siis autori hinnangul oleks pidanud antud töö raames võtma katsekehad vastu suuremat koormust kui 2018. aasta kevadel läbi viidud katsetel. Paraku selgub autori poolt läbi viidud katsete tulemustest, et nii see polnud. Kullamaa katsete käigus (2018) võttis katsekeha 01 KK 2-3 17,9% niiskusesisalduse juures esimese koormustsükli käigus vastu koormust 6,30 kN, sealjuures oli katsekeha survesilindri äärsete andurite 1 ja 2 keskmine siire 13,30 mm (Kullamaa jt 2018). Käesoleva uurimuse käigus võttis sama katsekeha niiskusesisalduse 8,42% juures vastu suurimat koormust 3,35 kN ning seejuures oli siire 15,61 mm. Kuna antud siire on suurem ning koormus seejuures peaaegu poole väiksem, siis autori eelnev hinnang, et kuivema katsekeha puhul koormuse taluvus suureneb, ei vastanud tõele.

Autori hinnangul võib vastupidise efekti põhjuseks olla see, et antud katseseeria katsekehasid ei võetud taastamiseks lahti, kuna selleks polnud nähtavat vajadust. Sellest tulenevalt olid katsekehade lamellide vahele tekkinud puidu kuivamiskahanemisest vahed, mida hoidsid kinni kruvid. Kuna katsekehad asetati toerakisesse ning lamellidel olid vahed sees, siis ilmselt suruti koormamisel esmalt kokku lamellide vahed ning sellest tulenevalt ei võtnud katsekeha vastu ka oodatud koormust. Samalaadset käitumist täheldas autor ka teiste seeria 01 katsekehade puhul.

Seeria 03 puhul on kõige huvitavam see, et katsekeha 03 KK 1-3 puhul toimus katsekeha vastupanuvõime vähenemine koormusele kuni tsüklini 200. Teistel sama seeria katsekehadel jäid tulemused suhtelised sarnaseks ning erilist langust enam peale esmast vähenemist ei toimunud. See tähendab seda, et katsekehade 03 KK 3-3 ja 03 KK 2-3 puhul olulisi jäävdeformatsioone peale 25. tsükli enam ei tekkinud. Katsekeha 03 KK 2-3 oluliselt halvemat vastupanu koormusele seletab autor sellega, et katsekeha oli ainuke, mida antud seerias ei olnud taastamiseks lahti võetud.

Seeria 04 katsekehade puhul on vastupanuvõime vähenemisel koormusest näha kolme erinevat käitumist. Katsekeha 04 KK 1-3 puhul toimus kuni viimaste tsükliteni katsekeha koormusele vastupanu vähenemine. Katsekeha 04 KK 2-3 puhul on näha koormuse ühtlast vähenemist, kuni peale 90. tsükli tekib koormuse vastupanuvõime äkiline vähenemine – 90. tsüklil tekitab katsekeha koormusele vastupanu 10,31 kN ning 91. tsüklil 9,78 kN. Pärast seda hakkab koormuse vastupanuvõime tõusma ning seejärel langeb uuesti. Sellist käitumist on graafikult (joonis 3.1; seeria 04) näha mitmel korral ning see on autori hinnangul seotud katsekehade taastamisega – lahtivõtmise, lamellide väljavahetamise, uuesti kokku monteerimise ning lamellide purunemisega. Antud katsekeha koormamise käigus kuulis autor ka kõva pauku, mida seostab 90. tsükli järgse äkilise koormuse vastupanuvõime vähenemisega. Kuna autor ei võtnud antud katsekeha lahti, siis ei saa kindlalt väita, et mõni lamell purunenud oleks, aga arvatavasti see siiski juhtus, peale mida hakkas katsekeha endas koormust ümber jaotama ning sellest tulenevalt on graafik mõningate suuremate hüpetega. Antud katsekeha oli taastamise käigus võetud lahti ühelt poolt ning sellega seoses oli välja vahetatud lamell L17.

Protsentuaalselt kaotas kõige vähem oma vastupanuvõimes koormusele katsekeha 04 KK3-3, mida ei olnud taastamiseks lahti võetud ning millel tekkisid ka kõige väiksemad jäävdeformatsioonid. Katsekehal 04 KK 3-3 tekkinud kõige väiksemaid jäävdeformatsioone seletab autor sellega, et ilmselt ei ole lamellide niiskusesisaldusest tingitud mahukahanemine suurema eeltõusuga katsekehade puhul enam nii oluline. Katsekehade lamellides on sees suurem eelpinge ning katsekeha kaksikkõvera kujust tingituna surub katsekeha ise lamelle tihedamalt üksteisele vastu – puidu niiskusesisalduse vähenedes ei teki lamellide vahele suuri vahesid. Seda kinnitab ka seeriade 01 ja 02 katsekehade käitumine, mille puhul oli tegemist väiksema eeltõusuga katsekehadega ning nendes tekkisid niiskusesisalduse vähenemisega katsekeha lamellide vahele visuaalselt hinnates suured vahed.

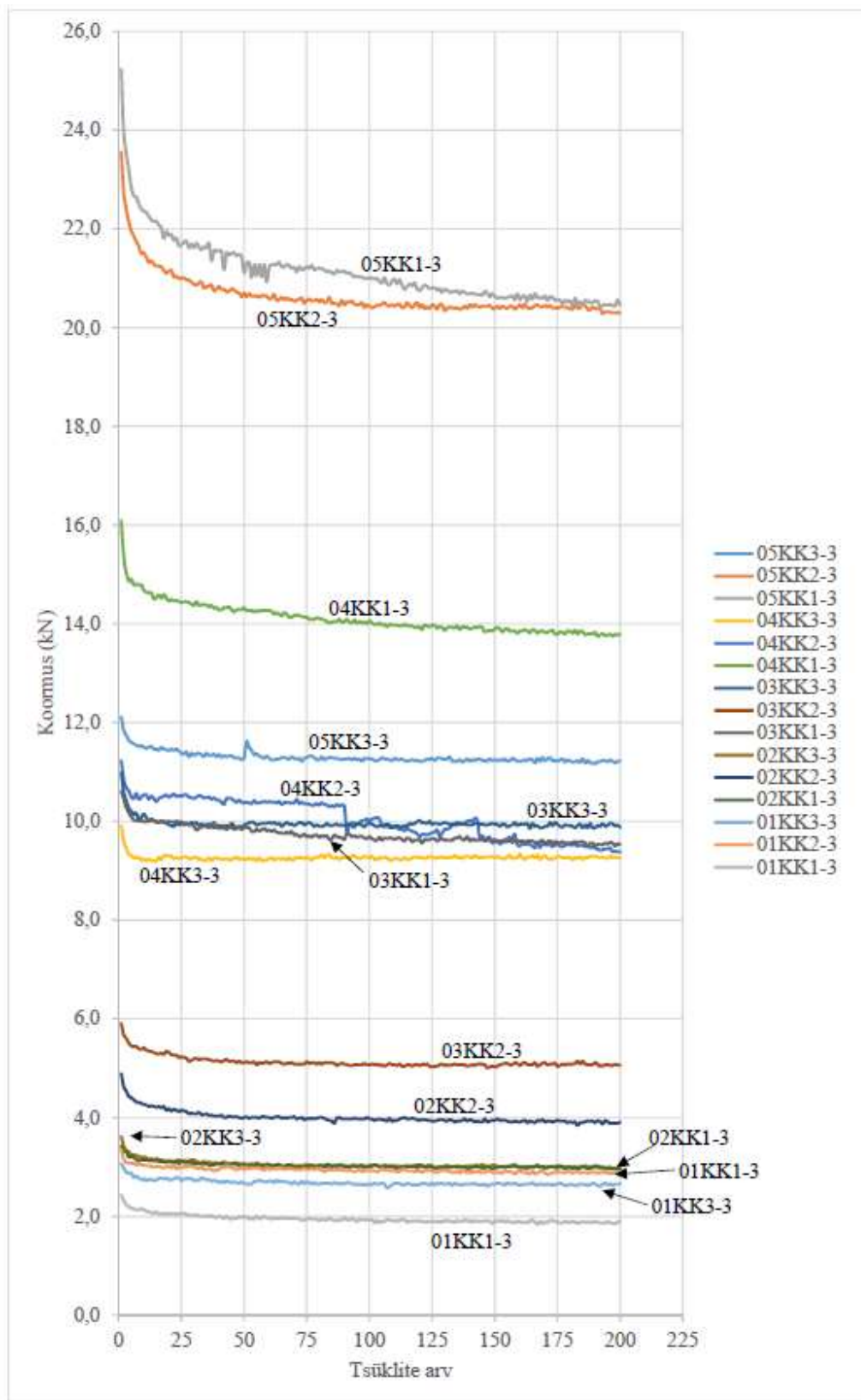
Katsekeha 05 KK 1-3 keskmine eeltõus oli 66,3 mm, katsekehal 05 KK 2-3 67,0 mm ning katsekehal 05 KK 3-3 51,0 mm (lisa 5). Siinkohal on oluline välja tuua, et katsekeha 05 KK 3-3 oli enne autori poolt teostatud katseid koormatud umbes 60 koormustsükliga ning seejuures küündisid koormused kuni 30 kN. Täiendavad koormustsüklid olid läbi viidud, kuna antud katsekehaga teostati proovikatseid ja lisaks jäädvustati konstruktsioonitüübi käitumist koormamisel erinevate esitluste tarbeks videokaameratega. Samuti ei võetud katsekeha 05 KK 3-3 taastamiseks lahti, teised sama seeria katsekehad võeti taastamiseks

mõlemalt poolt lahti. Kuna katsekeha 05 KK 3-3 oli eelnevalt koormatud tunduvalt rohkem kui teisi sama seeria katsekehasid, siis kajastus see ka tulemustes. Katsekeha vastupanuvõime koormusele ning eeltõus olid tunduvalt väiksemad kui teistel sama seeria katsekehadel. Lisaks kaotas antud katsekeha ka protsentuaalselt kõige vähem vastupanuvõimes koormusele ning tekkisid ka kõige väiksemad jäävdeformatsioonid – seega toimusid need muutused suuresti juba eelnevate koormamiste käigus.

Võrreldes katsekeha 05 KK 1-3 autori poolt läbi viidud katsetulemusi Kullamaa katsete tulemustega, siis võttis antud katsekeha Kullamaa neljanda koormustsükli käigus vastu koormust 25,04 kN (Kullamaa jt 2018). Seejuures oli katsekeha siire keskmiste andurite järgi keskmiselt 65,05 mm ning katsekeha keskmine niiskusesisaldus 15,8%. Autori poolt läbi viidud katsete käigus oli esimesel koormustsüklil katsekehale rakendatud koormus 25,23 kN, katsekeha niiskusesisaldus 5,1% ning siire 27,3 mm. Katsete käigus rakendatud koormused (Kullamaa 2018/ Karu 2019) on ligilähedaselt samas suurusjärgus, vahe kõigest 0,19 kN, kuid katsekehade siirded koormamise hetkel on üksteisest erinevad ligikaudu 2,4 korda. Autori hinnangul mängib siinkohal olulist rolli katsekehade niiskusesisaldus, mis oli autori poolt läbi viidud katsete käigus oluliselt väiksem.

Katsekeha 05 KK 2-3 katsete tulemusena selgus, et kui Kullamaa katsete käigus oli katsekeha niiskusesisaldus 14,7%, maksimaalne siire katsekeha keskosas esimesel koormustsüklil 27,91 mm ning koormus seejuures 20,4 kN (Kullamaa jt 2018), siis autori poolt läbi viidud katsete käigus oli esimesel koormustsüklil rakendatav koormus 23,56 kN, siire 27,4 mm ning niiskusesisaldus 5,0%. Autori poolt rakendatav koormus katsekehale oli suurem ning seejuures oli katsekeha siire ning niiskusesisaldus väiksemad. See tõestab taas seda, et puidu tugevusomadused on väiksema niiskusesisalduse juures oluliselt paremad.

Joonise 3.1. puhul on esitatud graafikud seeriade kaupa ning seejuures on nende teljestike vahemikud erinevate väärtustega, et tuua paremini välja katsekehade käitumine. Seetõttu esitas autor tulemused ka ühtse graafikuna, kus on välja toodud kõikide katsekehade tulemused ühtses skaalas (joonis 3.2.), et seeriade vahelised erinevused oleksid paremini näha.



Joonis 3.2. Seeriade 01...05 katsekehade koormusele vastupanuvõime vähenemine sõltuvalt tsüklite arvust (Karu jt 2019).

Võrreldes kõikide seeriade tulemusi, siis on üldjoontes näha seda, et mida suurem oli katsekeha eeltõus, seda suuremat koormust võttis katsekeha vastu (joonis 3.2.). Katsekehade puhul, mida ei võetud taastamiseks lahti, on näha seda, et vastupanuvõime koormusele on ühtlasem. Kõige kõikumamate tulemuste ning ka kõige suurema vastupanuvõime vähenemisega koormusele olid samuti katsekehad, mis võeti taastamiseks lahti. Seeriade 03...05 puhul oli kõige väiksem vastupanuvõime koormusele katsekehadel, mida ei võetud taastamiseks lahti. Siit võib välja tuua selle, et katsekeha taastamise käigus lahti võetud katsekehade vastupanuvõime koormusele paranes ja seda autori hinnangul seetõttu, et kuna niiskusesisaldus oli katsekehades madalam kui katsekehasid kokku monteerides, siis tekkisid mahukahanemisest lamellide vahele vahed, aga taastamise käigus paigutati lamellid uuesti üksteisega tihedalt kokku.

Jooniselt 3.2. on näha seda, et kuigi suurem katsekeha eeltõus üldjoontes tagab suurema vastupanuvõime koormusele, siis on erinevate seeriade katsekehade tulemustes kattuvused. Autori hinnangul on need põhjustatud katsekehade taastamisest seeriatel 03...05, sest taastamisega suurenes katsekeha vastupanuvõime koormusele ning põhjendused on eelnevalt juba välja toodud. Seeriade 01...02 katsekehade tulemuste kattuvust ei oska autor otseselt põhjendada, kuid arvab, et tegemist on lihtsalt katsekeha ehitamisest tulenevatest põhjustest, nagu näiteks kvaliteetsema materjali valik mõne katsekeha puhul, sest nende seeriade katsekehasid taastamiseks lahti ei võetud. Seeria 01 puhul on näha selgelt seda, et katsekeha, millega Kullamaa viis läbi täiendava koormustsükli, oli väiksema vastupanuvõimega koormusele kui teised sama seeria katsekehad. Seeria 02 puhul jäi täiendava koormustsükli saanud katsekeha tulemuselt samasse suurusjärku nagu sama seeria teinegi katsekeha.

3.3. Arutelu

Katsete eesmärk oli uurida uudse konstruktsiooniga kiilukujulistest lamellidest koosneva eeltõusuga katsekehade käitumist palju-tsüklilistel koormamisel, eesmärgiga juurutada kahekõveruselise sillateki konstruktiivne lahendus praktikasse. Katsekehade käitumist uuriti jäävdeformatsioonide ning rakendatava koormamise kaudu konstantse siirdeni.

Katsetest selgus, et autori esialgsed hinnangud ei pidanud paika. Autor eeldas, et Kullamaa poolt läbi viidud tsüklilised koormuskatsed ning negatiivsesse geomeetriasse surutud amortiseerunud katsekehade taastamine ei mõjuta oluliselt autori poolt läbiviidavate katsete tulemusi, sest Kullamaa hinnangul tekkisid katsekehades suured deformatsioonid, kuid katsekehad taastasid suuresti oma esialgse kuju ehk jäävdeformatsioone puidus ei tekkinud (Kullamaa 2018: 61). Oli näha, et katsekehade lahtivõtmine, lamellide väljavahetamine ning uuesti kokkumonteerimine avaldas olulist mõju erinevate katsekehade tulemustele.

Katsekehade vastupanuvõime koormusele oli iga seeria siseselt suuresti erinev. Kui näiteks seeria 02 puhul olid kahe katsekehaga läbiviidud katsete tulemused samas suurusjärgus, siis kolmanda katsekeha tulemus erines eelnevatest oluliselt. Samasugune muster läbis kõiki katseseeriad peale esimese. Lisaks tekkisid seeriasiseselt katsekehades erinevate suurustega jäävdeformatsioonid, mis autori hinnangul on samuti seotud eelnevalt läbiviidud täiendavate koormustsüklite ning katsekehade taastamisega.

Katsekehasid taastati erinevalt – mõni võeti lahti ühelt poolt tsentrit, teine täielikult ning osaliselt vahetati purunenud lamelle uute vastu. Lisaks oli iga seeria katsekehadega 01...05 KK 1-3 viidud läbi täiendavaid tsüklilisi koormamisi Kullamaa poolt ning katsekehaga 05 KK 1-3 veel ka autori poolt. Kokkuvõttes oli antud katsekehade hulgas liiga palju muutuvaid tegureid, et konkreetseid järeldusi välja tuua. Siiski andis autor oma hinnangu iga katsekeha käitumisele, mis erines teiste sama seeria katsekehade käitumisest ning osaliselt sai autor tulemusi võrrelda ka Kullamaa katsete tulemustega.

Katsekehadega läbi viidud katsete tulemustes oli näha väiksemaid ning suuremaid muutusi katsekeha vastupanuvõimes koormusele. Väiksemad hälbed on autori hinnangul osaliselt seletatavad sellega, et katsetulemuste salvestamine toimus sagedusega 6 Hz ning osaliselt ei

pruukinud pressi maksimaalne siire ja andmete salvestamine ühtida täpselt õigel hetkel. Suuremaid erinevusi graafikutes seletab autor sellega, et katsekehades tekkisid muutused ja jäävdeformatsioonid. Oluline punkt, miks autori arvates katsekehades muutused toimusid, on see, et katsekehade taastamiseks lahti võtmise käigus oli näha, kuidas Kullamaa poolt läbiviidud katsete ajal olid kruvid oma pesast lamelli tasapinnast kas välja- või sissepoole tõmmatud või muljutud. Lamellide otstes ehk toepiirkonna alal olid kruvipead lamellide tasapinnast väljaspool. Seevastu katsekeha keskosas paiknesid kruvid tasapinnast seespool, eriti lamellide alumistes servades, kus toimub koormamisel kõige suurem lamellide eraldumine. Kuna katsekehade taastamise käigus oli näha ka seda, et puitu oli Kullamaa katsete käigus osaliselt ikkagi muljutud, siis autori hinnangul tekkisid graafikutes nähtavad kõikumised eelnevatel põhjustel. Kruvisid hakati oma pesast välja- või sissepoole muljuma ning puidus hakkasid tekkima jäävdeformatsioonid puidu rakuseina väsimuse näol ning see omakorda tekitas muutusi katsekeha kui ühtse konstruktsiooni töös ja koormused hakkasid ümber jagunema.

Katsekehade niiskusesisaldus oli autori poolt läbi viidud katsete ajal oluliselt madalam kui Kullamaa katsete käigus. Kuigi autor eeldas, et kuivema puidu korral on katsekeha vastupanuvõime koormusele suurem, siis näiteks seeria 01 puhul ei pidanud see paika katsekehade iseäraliku konstruktsiooni ning lamellide omavahelise ühendamise viisi tõttu. Seeria 01 katsekehasid ei võetud taastamiseks lahti ning katsekehade niiskusesisalduse vähenemise käigus tekkisid lamellide vahele vahed, mida jäid hoidma lamellide kinnitusvahendid ehk kruvid. Koormamisel suruti esmalt kokku lamellide vahed ning seetõttu oli autori poolt läbiviidud katsete käigus katsekehade keskmine niiskusesisaldus küll väiksem, kuid katsekehad võtsid Kullamaa katsetega võrreldes vastu oluliselt väiksemat koormust ning seejuures olid siirded suuremad.

Kui autor taastas katsekeha, siis oli näha seda, et kuivema puidu korral on katsekehade vastupanuvõime koormusele parem kui kõrgema niiskusesisalduse juures. Antud olukorras on oluline välja tuua, et väiksema niiskusesisaldusega katsekehad võtsid vähem koormust vastu ainult sellisel juhul, kui katsekeha lamellide vahele olid tekkinud mahukahanemisest vahed. Kokkuvõtvalt võib öelda, et kui antud konstruktsioonis tervikuna väheneb niiskusesisaldus, siis väikese katsekeha eeltõusu puhul mõjub see katsekehale koormustaluvust vähendavana, kui aga katsekeha pannakse väiksema niiskusesisalduse juures kokku, siis see suurendab konstruktsiooni koormustaluvust.

Suurema eeltõusuga katsekehade juures märkas autor enne katseid visuaalsel vaatlusel, et katsekehade lamellide vahel ei olnud nii suured vahed kui väiksema eeltõusuga seeriade puhul. Autori hinnangul võib selline efekt tekkida katsekeha suuremast eeltõusust tingitud suuremast eelpingest lamellides. Kui kaarekuju on suurem, siis on katsekeha kaksikkõvera kujust tulenevalt lamellides suurem eelpinge, mis omakorda surub lamelle ise tihedamalt üksteise vastu.

Igas katseseerias oli näha, et kõige suurem katsekeha vastupanuvõime vähenemine koormusele toimus esimestel tsüklitel, mille järel toimus väike stabiliseerumine ning siis jätkus vähenemine väiksemal määral ning sujuvamalt. Kuigi autor viis läbi 200 koormustsükli, siis kindlasti ei saavutatud sellega katsekehade stabiilset vastupanuvõimet koormusele. See tähendab seda, et 200 koormustsükliga puidu rakusein ilmselt ei väsinud ning ei tekkinud ka maksimaalseid plastseid deformatsioone. Autori hinnangul näitab see seda, et sellise konstruktsiooni katsetamise puhul ei ole võimalik saada teada antud tsüklite arvuga konstruktsiooni maksimaalseid jäävdeformatsioone. Kui 200 koormustsükliga ei saavutanud autor katsekehade vastupanuvõimes koormusele stabiilsust, vaid tulemused näitasid jätkuvat langust, siis Kullamaa poolt läbi viidud 2018. aasta katsete tulemused on väga väheste tsüklite arvu tõttu veelgi üldisemad ning nende põhjal on võimalik hinnata ainult konstruktsiooni esmast käitumist.

Võrreldes katsekehade esimese koormustsükli vastupanuvõimet koormusele viimase tsükliga, oli selgelt näha, et igal katseseerial toimus selles langus. Katsekehade vastupanuvõime koormusele vähenes keskmiselt 14,94%. Kõige vähem langes seeriade 04 ja 05 puhul vastupanuvõime koormusele katsekehadel, mida ei võetud taastamiseks lahti. Kuna antud katsekehades tekkisid ka kõige väiksemad jäävdeformatsioonid, siis seletab autor seda sellega, et jäävdeformatsioonid olid katsekehades tekkinud juba eelnevate katsete käigus.

Antud katsed kinnitasid ka osaliselt juba Kullamaa poolt välja toodud seisukohti. Oli näha, et mida suurem on katsekeha eeltõus, seda suurem on ka selle vastupanuvõime koormusele. Lamellid töötasid omavahel kui kiilud, mis koormuse rakendumisel omavahel kinni suruti. Katsekehades hakkas puit tööle oma kõige kasulikumas suunas ehk pikikiudu. Katsekehad taastasid osaliselt oma deformatsioonid ehk puidus ei tekkinud täielikult plastseid deformatsioone.

Kui vaadelda seeriate 01...05 katsekehade eeltõuse, siis on selge, et suure eeltõusuga katsekehasid, nagu näiteks seeriad 04 ja 05, reaalselt sillatekina kasutada ei saaks, sest kalle oleks täismõõtmetes sillatekil lihtsalt liiga suur. Katsetatud on neid seetõttu, et luua paremaid seoseid erinevate eeltõusude ning nende omaduste vahel. Autori hinnangul oleks reaalsuses mõeldav kasutada esimestes seeriates kasutatavaid eeltõuse. Sel juhul ei omaks niiskusesisaldus lamellide kokkumonteerimisel nii suurt rolli. Väiksema eeltõusu puhul on lamellide kiilukuju väiksem ning ei teki nii suurt kõverust ja seetõttu ei peaks olema kasutatav puit sillateki kokkupanekul küllastusniiskuse juures. Väiksem niiskusesisaldus lamellides vähendaks mahumuutuse probleemi, mis kaasneb lamellide niiskusesisalduse vähenemisega. Antud probleem on ka tavalise pingelamellplaadist sillateki puhul – kui plaat on kokku pandud lamellide liiga kõrge niiskusesisaldus juures, siis seoses kuivamiskahanemisega kaob lamellide vaheline hõõrdejõud.

Autori hinnangul omab antud töö käigus katsetatud konstruktsioonitüüp suurt potentsiaali, kuid sellel on siiski ka mitmeid kitsaskohti. Üheks probleemseks kohaks on lamellide omavaheline ühendus. Antud katsekehades kasutati puidukruve, kuid nagu katsetest selgus, siis väiksema eeltõusuga katsekehade puhul tekitasid need negatiivse efekti. Kui niiskusesisaldus puidus vähenes, siis lamellide vahele tekkisid vahed ning üksteisest distantseerunud lamelle hoidsid kinni puidukruvid, mistõttu võtsid katsekehad vastu ka väiksemat koormust. Kuigi antud konstruktsioonitüübis on puit võimalik panna tööle temale kõige kasulikumas suunas, siis tõstatas autoris küsimusi antud konstruktsiooni otstarbekus, sest tehnoloogiliselt on antud konstruktsiooni käsitsi kokkupanek äärmiselt aeganõudev. Tehnoloogiliselt oleks mõeldav, kui sillatekk toodetaks valmis tehases, kuid siis hakkaksid segama transpordist tulenevad piirangud.

KOKKUVÕTE

Puidul on sillaehitusmaterjalina kõrge potentsiaal tänu heale tugevusele omakaalu suhtes. Aegade vältel on puitu kasutatud sillaehitusmaterjalina väga palju, samuti leiab häid näiteid ka tänapäeva maailmast. Näiteks on põhjamaades ehitatud hulgaliselt puidust sildu, sealhulgas ka maantee sildu. Eestis on puit sillaehitusmaterjalina kahjuks pigem harv nähtus, sest puuduvad head juhendmaterjalid ja ka oskused kestvaid sildu ehitada.

Uurimistöö eesmärgiks oli taastada Kullamaa magistratöö katsete käigus kahjustada saanud katsekehad ning seejärel uurida nende käitumist palju-tsüklilisel koormamisel läbi koormusele vastupanuvõime vähenemise ning jäävdeformatsioonide. Kuigi osaliselt kasutas autor Kullamaa katsetoodikat, siis palju-tsükliliseks koormamiseks lõi autor oma katsetoodika.

Katsekehad koosnesid kiilukujulistest lamellidest, mis tekitasid katsekehale eeltõusu. Lamelli ristlõige oli keskosast suurema kiilu kujuga kui otstest, mistõttu oli katsekeha otstest laiem kui keskosast ning tekkis kaksikkõvera kuju. Tugedest ning lamellide kiilu kujust tulenevalt tekkis katsekeha lamellides kiilsilluse efekt. Kokku oli viis seeriat ja igas seerias kolm katsekeha. Iga seeria katsekehadel oli võrreldes eelmisega järjest suurem eeltõus.

Katsekehade taastamiseks võttis autor lahti Kullamaa magistratöö raames ehitatud katsekehad, mis olid katsete käigus saanud kahjustada. Lahti monteerimise käigus uuris autor visuaalselt katsekehade lamellides toimunut. Seejärel pandi katsekehad uuesti kokku ning seejuures vahetati välja purunenud lamellid autori poolt valmistatud uute lamellidega.

Peale katsekehade taastamist viis autor katsekehade läbi palju-tsüklilise koormamise. Katsekehad paigutati toerakisesse, kus fikseeriti šarniirsete tugevate X- ja Y-teljeline liikumine neljast nurgast. Katsekehasid koormati 200 koormustsükliga. Erinevate seeriade võrdlemiseks valis autor koormamise tingimuseks siirde, mis valiti igal katsekehal 20% vahemaast tema toetusnurkadest pealispinnani. Katsete käigus jälgiti katsekehade koormusele vastupanuvõime vähenemist ning jäävdeformatsioone.

Katsete tulemustest selgus, et autori eeldus, et katsekehade taastamine ei mõjuta katsete tulemusi oluliselt, ei pidanud paika. Katsekehade vastupanuvõime koormusele oli iga seeria siseselt suurte erinevustega ning põhjenduseks on autori hinnangul see, et osa katsekehi oli taastamiseks lahti võetud. Seega ei saanud autor antud töö käigus seeriasiseselt statistilist keskmist tulemust ning see ei võimaldanud ka tuua konkreetseid järeldusi erinevate eeltõusudega katsekehade vahel. Autor andis omapoolseid hinnanguid katsekehadele, mis tema arvates tulemustes erinevusi tekitasid. Kõikides katsekehades tekkisid peale koormamist jäävdeformatsioonid. Katsekehade vastupanuvõime koormusele vähenes keskmiselt 14,94%.

Autori hinnangul omab antud konstruktsiooni tüüp suurt potentsiaali, kuna see annab võimaluse panna puit tööle temale kõige kasulikumas suunas ehk pikikiudu, kuid siiski on mitmeid tehnoloogiliselt lahendamata probleeme. Antud konstruktsiooni puhul võib tekkida probleeme selle kokku monteerimisel, mis oleks liiga aega nõudev ja keerukas. Lisaks pole kruvidega lamellide omavaheline kinnitamine kõige parem lahendus, sest väikese eeltõusuga katsekehade puhul oli näha, kuidas antud kinnitusviis mõjus suurel niiskusesisalduse vähenemisel negatiivselt konstruktsiooni kandevõimele.

Autori hinnangul peaks edasiste uuringute puhul ehitama valmis mõõtkavale vastava suuremõõtmelise sillateki. See annaks parema ettekujutuse, kuidas antud konstruktsioon suuremate silletega ning seejuures väiksema lamellide ristlõikega tööle hakkab. Peale selle peaks tehnoloogiliselt lahendada paremini lamellide omavahelise monteerimise ning kinnitusviisi. Oluline oleks katsetada lamellides ka otsliite kasutamist, sest standardse saematerjali pikkused lõppevad tavaliselt 6 m juures.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Allikas, L., Kulbach, V.** (1962). Puitkonstruktsioonid. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus. 414 lk.
- Balasubramanian, A.** (2017). Bridges and their Types. Technical Raport. University of Mysore. 6 p. [on-line] https://www.researchgate.net/publication/315662977_Bridges_and_their_Types (16.04.2019).
- Bell, K.** (2008). Chapter 15. Timber Bridges. *Handbook 1 – Timber Structures*. Leonardo da Vinci Pilot Project, Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures, pp 209-226. [on-line] http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf (17.04.2019).
- Crews, K., Eng, M.,** (2015). Development and Application of Stress Laminated Timber Bridge Decks in Australia. Sydney, Australia. University of Technology. NZ Timber Journal, Issue 2, Volume 10, pp. 14-23. [on-line] https://www.researchgate.net/publication/240625487_DEVELOPMENT_AND_APPLICATION_OF_STRESS_LAMINATED_TIMBER_BRIDGE_DECKS_IN_AUSTRALIA (22.04.2019)
- Ekholm, Kristoffer.** (2013). Department of Civil and Environmental Engineering. Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden. 60 p. [on-line] <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/183986/183986.pdf> (24.04.2019).
- EVS-EN 1995-1-1:2007. (2007). Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldist. Üldreeglid ja reeglid hoonete projekteerimiseks. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1995-2+NA:2007. (2007). Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 2: Sillad. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 338:2016. (2016). Ehituspuit. Tugevusklassid. Eesti Standardikeskus.
- Juske, A.,** (1993). Vesiveskid. Tallinn. Kirjastus Valgus. 218 lk.
- Just, A., Gustafsson, A., Pousette A., Just, E., Fjellström, P.-A.** (2015) Põhjamaades kasutatud puitsildade lahendused ja erinevate konstruktiivsete lahenduste vastupidavuse teadusanalüüs koos kasutustepanekutega Eestis. Uuringu raport. Eesti teedeklastri tellimusel Rootsi tehnilise uurimise instituudi ja TTÜ spetsialistide koostööna. 255 lk.
- Just, E.-J., Öiger, K., Just, A.** (2015). Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid. Tallinn: TTÜ. 431 lk.
- Karu, O., Teppand, T., Reitsnik, R.** (2019). Test Report: Multi-Cyclic loading tests for analysing load capacity and permanent deformations of bridge deck models made of wedge-shaped cross-sectional pre-stressed timber lamellae. Manuscript, Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia.

- Kermani, A., Freedman, G.** (2005). Performance of a stress-laminated-timber arch bridge. *Bridge Engineering*. Volume 158, pp 154-164. [on-line] <https://www.napier.ac.uk/~media/worktribe/output-250201/bren158155pdf.pdf> (10.05.2019)
- Kuklik, P.** (2008). Chapter 1. History of Timber Structures. *Handbook 1 – Timber Structures*. Leonardo da Vinci Pilot Project, Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures, pp 1-14. [on-line] http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook1_final.pdf (13.04.2019).
- Kullamaa, L.** (2018). Läbipainete ja jäävdeformatsioonide uurimine tsüklilisel koormamisel kiilukujulise ristlõikega puitlamellidest sillateki mudelitel. Magistritöö. Eesti Maaülikool, Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 65 lk.
- Kullamaa, L., Teppand, T., Karu, O.** (2018). Test Report: Cyclic loading test for analysing deflections and permanent deformations of bridge deck models made of wedge-shaped cross-sectional pre-stressed timber lamellae. Manuscript, Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia.
- Leet, L.** (2015). Õigesti hooldatud puitsild ei varise. – *Ehitus. Oktoober 2015*. [on-line] <https://www.asfaldiliit.ee/file.php?feID=3c2614aecdd9a67d3d55b9724984ab38> (12.03.2019)
- Lin, W., Yoda, T.** (2017). Bridge engineering: Classifications, Design Loading and Analysis Methods. Butterworth-Heinemann, An imprint of Elsevier. pp 273. [on-line]. https://books.google.ee/books?hl=en&lr=&id=6op4CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Bridge+engineering:+Classifications,+Design,+Loading+and+Analysis+Methods.&ots=9K5y9iT9OY&sig=ssbsz3Gauqd07_4LoKN5hHTCzwo&redir_esc=y#v=onepage&q=Bridge%20engineering%3A%20Classifications%2C%20Design%2C%20Loading%20and%20Analysis%20Methods.&f=false (30.04.2018)
- Maanteeamet. (s. a.). Sillad riigiteedel. [on-line] <https://www.mnt.ee/et/tee/eesti-teedevork/sillad-riigiteedel> (16.05.2019).
- Massaro, F., M., Malo, K., A.** (2014). Review of pre-stressed timber bridge decks: durability, layout and structural systems. *COST Timber Bridge Conference – CTBC 2014*. (Eds. S. Franke, B. Franke, R. Widmann), Bern University of Applied Sciences, Biel, Switzerland, pp 9-15.
- Matve, H.** (2004). /Koost. D. Matve. Eesti sillaehitus: Teadusliku uurimustöö faktimaterjal. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 172 lk.
- Partov, D., Maslak, M., Ivanov, R., Petkov, M., Sergeev, D., Dimitrova, A.** (2016). The Development of Wooden Bridges Through the Ages – A Review of Selected Examples of Heritage Objects. Part 1 – The Milestones. *Technical Transactions, Civil Engineering*, 2-B/2016, pp 94-105. [on-line] (20.04.2019).
- Perv, L., Sinisalu, M.** (2015). Puitkonstruktsioonide uurimine Vaida jalakäijate silla näitel. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikooli Teedeinstituut. Tallinn. 63 lk.

- Pousette, A.**, (2016). Chapter 9. Structural systems for infrastructure. *Design of Timber Structures. Structural aspects of timber construction. Volume 1.* (Editor E. Borgström), Stockholm, Swedish Forest Industries Federation. pp. 293-310.
- Pousette, A., Malo, K.A., Thelandersson, S., Fortino, S., Salokangas, L., Wacker, J.** (2017). Durable Timber Bridges Final Report and Guidelines. Uuringu raport . RISE Research Institutes of Sweden. 177 p.
- Ramage, M.R, Burrige, H., Busse-Wicherc, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D.U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P.F., Scherman, O.** (2016). The wood from the trees: The use of timber in construction. – *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2017, Volume 68, part 1, pp 333–359. [on-line] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306050> (15.02.2019).
- Ritter, M.-A.** (1990). Timber Bridges: Design; Construction, Inspection, and Maintenance. Washington, DC. 944 p.
- Ritter, M.-A., Wacker, J.P., Duwadi, S.R.**, (1995). Field Performance of Stress-Laminated Timber Bridges on Low-Volume Roads. - *Proceedings of 6th International conference on low-volume roads*. Minneapolis, MN. Washington, DC: National Academy, pp 347-356.
- Saarman, E., Veibri, U.** (2006). Puiduteadus. Tartu: Eesti Metsaselts. 560 lk.
- Smith, I., Landis, E., Gong, M.** (2003). Fracture and Fatigue in Wood. John Wiley & Sons LTd, England. 229 p.
- Teppand, T., Buchner, J., Irle, M.** (2018). Test Report: examination of the specimen of glue-lam laths at macro level. Manuscript, Groupe ESB École supérieure du bois, Nantes, France.
- Tärno, Ü.**, (2003). Ehituslike ruumstruktuuride mudelkatsetused. Tallinna Tehnikaülikool. TTÜ kirjastus. 148 lk.
- Wegscheider, J., Kermani, A., Freedman, G., Colla, C.** (2010). Cyclic Response of a Stress-Laminated Timber Arch Bridge. *World Conference on Timber Engineering 2010*.

LISAD

Lisa 1. Seeria 01 katsekehade ja katsete andmed

Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	12.04.2019	01 KK 1-3	15,317	L02 P ots	5,6	6,5	14:03	14:41	Ots V	9,0	2,0	2,0	79,0
				L02 V ots	7,5				Ots P	11,0	3,0	3,0	81,0
				L19 P ots	6,9				Keskmine	10,0	2,5	2,5	80,0
				L19 V ots	5,0				Keskmisest 20%				16,0
				L10 keskelt	7,4				Tsentrist silindrini	266,0	275,0	275,0	
				Märkused:									
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	12.04.2019	01 KK 2-3	16,120	L02 P ots	8,2	7,3	13:02	13:38	Ots V	7,0	0,0	0,0	77,0
				L02 V ots	7,3				Ots P	9,0	2,0	2,0	79,0
				L19 P ots	6,7				Keskmine	8,0	1,0	1,0	78,0
				L19 V ots	5,9				Keskmisest 20%				15,6
				L10 keskelt	8,5				Tsentrist silindrini	269,0	277,0	277,0	
				Märkused:									
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	12.04.2019	01 KK 3-3	16,042	L02 P ots	5,5	6,8	12:02	12:39	Ots V	9,0	1,0	1,0	79,0
				L02 V ots	7,0				Ots P	9,0	2,0	2,0	79,0
				L19 P ots	6,7				Keskmine	9,0	1,5	1,5	79,0
				L19 V ots	6,7				Keskmisest 20%				15,8
				L10 keskelt	8,1				Tsentrist silindrini	267,0	276,0	276,0	
				Märkused:									
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													

Lisa 2. Seeria 02 katsekehade ja katsete andmed

Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsüklit	12.04.2019	02 KK 1-3	14,270	L02 P ots	7,2	6,6	14:03	14:41	Ots V	17,0	11,0	12,0	87,0
				L02 V ots	5,7				Ots P	17,0	11,0	12,0	87,0
				L19 P ots	5,7				Keskmine	17,0	11,0	12,0	87,0
				L19 V ots	6,0				Keskmisest 20%				17,4
				L10 keskelt	8,3				Tsentrist silindrini	260,0	266,0	266,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsüklit	11.04.2019	02 KK 2-3	14,598	L02 P ots	5,0	6,8	17:51	18:27	Ots V	20,0	12,0	13,0	90,0
				L02 V ots	6,1				Ots P	21,0	14,0	14,0	91,0
				L19 P ots	6,8				Keskmine	20,5	13,0	13,5	90,5
				L19 V ots	6,3				Keskmisest 20%				18,1
				L10 keskelt	9,6				Tsentrist silindrini	256,0	264,0	264,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsüklit	11.04.2019	02 KK 3-3	13,843	L02 P ots	6,3	6,3	16:45	17:21	Ots V	20,0	11,0	12,0	90,0
				L02 V ots	5,5				Ots P	20,0	13,0	13,0	90,0
				L19 P ots	6,5				Keskmine	20,0	12,0	12,5	90,0
				L19 V ots	6,0				Keskmisest 20%				18,0
				L10 keskelt	7,4				Tsentrist silindrini	259,0	266,0	266,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													

Lisa 3. Seeria 03 katsekehade ja katsete andmed

Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	11.04.2019	03 KK 1-3	14,819	L02 P ots	5,9	6,2	14:03	14:41	Ots V	36,0	29,0	29,0	106,0
				L02 V ots	5,7				Ots P	39,0	33,0	33,0	109,0
				L19 P ots	5,9				Keskmine	37,5	31,0	31,0	107,5
				L19 V ots	5,8				Keskmisest 20%				21,5
				L10 keskelt	7,6				Tsentrist silindrini	238,0	245,0	245,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	11.04.2019	03 KK 2-3	14,834	L02 P ots	6,1	6,4	14:31	15:05	Ots V	35,0	27,0	27,0	105,0
				L02 V ots	6,0				Ots P	35,0	27,0	27,0	105,0
				L19 P ots	7,3				Keskmine	35,0	27,0	27,0	105,0
				L19 V ots	6,8				Keskmisest 20%				21,0
				L10 keskelt	6,0				Tsentrist silindrini	241,0	250,0	250,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	11.04.2019	03 KK 3-3	14,711	L02 P ots	6,5	6,1	13:25	14:01	Ots V	41,0	35,0	35,0	111,0
				L02 V ots	7,0				Ots P	39,0	36,0	36,0	109,0
				L19 P ots	6,2				Keskmine	40,0	35,5	35,5	110,0
				L19 V ots	6,0				Keskmisest 20%				22,0
				L10 keskelt	4,9				Tsentrist silindrini	236,0	244,0	244,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													

Lisa 4. Seeria 04 katsekehade ja katsete andmed

Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	10.04.2019	04 KK 1-3	13,475	L02 P ots	6,0	6,1	14:03	14:41	Ots V	52,0	46,0	46,0	122,0
				L02 V ots	6,1				Ots P	53,0	45,0	45,0	123,0
				L19 P ots	5,5				Keskmine	52,5	45,5	45,5	122,5
				L19 V ots	5,9				Keskmisest 20%				24,5
				L10 keskelt	7,0				Tsentrist silindrini	225,0	234,0	234,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	10.04.2019	04 KK 2-3	13,862	L02 P ots	5,6	5,2	19:04	19:40	Ots V	55,0	46,0	46,0	125,0
				L02 V ots	3,5				Ots P	54,0	46,0	46,0	124,0
				L19 P ots	5,9				Keskmine	54,5	46,0	46,0	124,5
				L19 V ots	5,0				Keskmisest 20%				24,9
				L10 keskelt	5,8				Tsentrist silindrini	222,0	230,0	230,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsükli	10.04.2019	04 KK 3-3	13,531	L02 P ots	6,7	6,1	17:31	18:18	Ots V	51,0	46,0	46,0	121,0
				L02 V ots	5,8				Ots P	53,0	49,0	49,0	123,0
				L19 P ots	6,9				Keskmine	52,0	47,5	47,5	122,0
				L19 V ots	5,5				Keskmisest 20%				24,4
				L10 keskelt	5,7				Tsentrist silindrini	224,0	230,0	230,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													

Lisa 5. Seeria 05 katsekehade ja katsete andmed

Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsüklit	10.04.2019	05 KK 1-3	12,939	L02 P ots	5,0	5,1	14:03	14:41	Ots V	66,0	60,0	60,0	136,0
				L02 V ots	4,9				Ots P	66,5	59,0	59,0	136,5
				L19 P ots	5,7				Keskmine	66,3	59,5	59,5	136,3
				L19 V ots	4,9				Keskmisest 20%				27,3
				L10 keskelt	5,1				Tsentrist silindrini	211,0	220,0	219,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsüklit	09.04.2019	05 KK 2-3	12,941	L02 P ots	5,9	5,0	10:24	11:02	Ots V	67,0	60,0	60,0	137,0
				L02 V ots	4,0				Ots P	67,0	61,0	61,0	137,0
				L19 P ots	4,0				Keskmine	67,0	60,5	60,5	137,0
				L19 V ots	5,9				Keskmisest 20%				27,4
				L10 keskelt	5,2				Tsentrist silindrini	208,0	217,0	217,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Katset teostas Ott Karu ja Renno Reitsnik.													
Katse tüüp	Kuupäev	Katsekeha nimetus	Katse-keha kaal (kg)	Niiskusesisalduse mõõtekoht	Niiskuse-sisaldus (%)	Keskmine niiskusesisaldus (%)	Katse algus-kellaaeg	Katse lõpp-kellaaeg	Katsekeha eeltõusu mõõtmiskoht	Eeltõus enne katset (mm)	Eeltõus peale katset (mm)	Eeltõus 15 minutit peale katset (mm)	Vahemaa katsekeha toetuvate nurkade ning pealispinna vahel enne katset (mm)
Tsükliline koormamine, 200 tsüklit	09.04.2019	05 KK 3-3	13,509	L02 P ots	5,1	4,5	14:36	15:32	Ots V	50,0	48,0	50,0	120,0
				L02 V ots	4,6				Ots P	52,0	49,0	51,0	122,0
				L19 P ots	6,3				Keskmine	51,0	48,5	50,5	121,0
				L19 V ots	3,6				Keskmisest 20%				24,2
				L10 keskelt	3,1				Tsentrist silindrini	223,0	228,0	227,0	
Märkused:													
1) Katsekehadele rakendati koormust hüdraulilise pressiga Form+Test võimsusega 2×400kN.													
2) Katsekehade tsükliline koormamine toimus sagedusega 0,1 Hz ja siirdega 20% vahemaast katsekeha toetusnurkade ning pealispinna vahel.													
3) Katsekehade otsad on tähistatud katsekeha pealispinda märgitud tähistega "V"ja "P".													
4) Katsekehade lamellid on tähistatud numbritega.													
5) Katsekehade niiskusesisaldus mõõdeti seadmega GANN Hydromette HT 85 T ja kaaluti kaaluga KERN FKB.													
6) Esmalt teostati 50 koormustsüklit ning seejärel ülejäänud 150. Kahe koormamise vahel oli paus 15 minutit.													
7) Antud katsekeha oli eelnevalt koormatud umbes 60 koormustsükliga, mille käigus küündisid koormused kuni 30 kN-ni.													
8) Katset teostas Ott Karu, Renno Reitsnik ja Tõnis Teppand.													

Lisa 6. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Ott Karu,
sünnipäev 08.07.1995

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Kiilukujulise ristlõikega puitlamellidest sillateki mudelite käitumise uurimine paljutsüklilisel koormamisel“,

mille juhendajad on Tõnis Teppand ja Renno Reitsnik,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 3.06.2019

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)